

LES EMISSIONS DE PRODUITS PHYTOPHARMACEUTIQUES DANS L'AIR

Facteurs d'émission, outils d'estimation des émissions, évaluations environnementales et perspectives de recherche

Juillet 2016

Etude réalisée pour le compte de l'ADEME (Contrat n°14-60-C0083)
par Clarisse Guiral¹

avec la participation de Carole Bedos¹, Bernadette Ruelle², Claudine Basset-Mens³,
Jean-Paul Douzals², Pierre Cellier¹ et Enrique Barriuso¹

¹ UMR ECOSYS INRA, AgroParisTech (Thiverval-Grignon)

² UMR ITAP IRSTEA (Montpellier)

³ UR HortSys CIRAD (Montpellier)

Coordination technique : Thomas Eglin & Vincent Colomb – DPED / Service Agriculture et forêt,
ADEME Angers



SYNTHESE



REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier le Comité de projet (Tableau ci-dessous) pour leur suivi et conseils tout au long de l'étude ainsi que les experts sollicités et/ou rencontrés (listés en Annexe 1), Carole Sinfort et Erik van den Berg pour la relecture du rapport et Marina Pavlides pour sa contribution pour la recherche bibliographique et l'analyse bibliométrique.

Organisme	Nom
ADEME	Laurence GALSOMIES
	Vincent COLOMB
	Gilles AYMOZ
	Jérôme MOUSSET
ACTA	Samy AIT-AMAR
ANSES	Marion HULIN
	Carole LEROUX
	Valérie PERNELET-JOLY
	Mathilde MERLO
APCA	Sophie AGASSE
	Nathalie GALIRI
	Jérémy DREYFUS
CITEPA	Etienne MATHIAS
	Anaïs DURAND
ESA	Christel RENAUD-GENTIE
MAAF	Lionel LAUNOIS (DGPAAT)
	Ludovic WARANGOT (DGAL)
MEEM	Marion GUST (CGDD)
	Dominique THIERRY (CGDD)
	Aurélie VOLOKHOFF (DGEC)
Air Normand	Jérôme CORTINOVIS
	Véronique DELMAS
Lig'Air	Abdou YAHYAOU

CITATION DE CETTE SYNTHÈSE

Guiral C., Bedos C., Ruelle B., Basset-Mens C., Douzals J.P., Cellier P., Barriuso E., 2016. Les émissions de produits phytopharmaceutiques dans l'air. Facteurs d'émissions, outils d'estimation des émissions, évaluations environnementales et perspectives de recherche – Synthèse. ADEME. 47p.

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par la caractère critique, pédagogique ou d'information de l'œuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

1. Table des matières

1.	Introduction.....	4
1.1.	Objectifs et périmètre de l'étude.....	4
1.2.	Contexte général : les produits phytopharmaceutiques et leurs transferts vers l'atmosphère	5
1.2.1.	La protection des cultures en France (contexte tempéré et tropical) : les utilisations de pesticides en France relativement aux surfaces agricoles utiles et la connaissance des pratiques en cours	5
1.2.2.	Les transferts de pesticides dans l'air	6
1.2.3.	Le contexte politique et réglementaire (France / Europe).....	8
1.2.4.	Quels sont les besoins en termes de facteurs d'émission des pesticides ?	9
2.	Matériel et méthodes.....	10
3.	Synthèse des résultats.....	10
3.1.	Les outils d'estimation existants (facteurs d'émission, classes, relations, modèles).....	10
3.1.1.	Les facteurs d'émission (FE)	11
3.1.2.	Relations empiriques.....	13
3.1.3.	Les outils de hiérarchisation.....	15
3.1.4.	Les modèles	16
3.2.	Les jeux de données	25
3.3.	Les leviers d'action pour limiter les émissions vers l'atmosphère	27
4.	Conclusion - Les priorités opérationnelles	32
4.1.	Niveau de connaissances.....	32
4.1.1.	Sur les modes de transferts vers l'atmosphère et les facteurs les gouvernant	32
4.1.2.	Sur les pratiques influençant les émissions.....	33
4.1.3.	Sur les leviers d'action.....	33
4.2.	Outils pour estimer les émissions, et leur capacité à fournir des facteurs d'émission.....	33
4.2.1.	Les facteurs d'émissions (FE).....	33
4.2.2.	Les relations simples	34
4.2.3.	Les modèles mécanistes.....	34
4.2.4.	Les outils ACV	35
4.2.5.	Les outils utilisés dans le cadre de l'homologation.....	35
4.2.6.	Les jeux de données	35
4.3.	Capacité de ces outils à reproduire les pratiques (y compris dans les DOM) et leviers d'action	35
4.4.	Priorités de travail identifiées	36
	Sigles et acronymes	38
	References.....	39
	ANNEXE 1 : Liste des experts consultés	42
	ANNEXE 2 : Paramètres d'entrée pris en compte dans les différents outils identifiés.....	43

1. Introduction

1.1. Objectifs et périmètre de l'étude

Cette étude s'inscrit dans le cadre d'une préoccupation croissante portant sur l'exposition des populations aux produits phytopharmaceutiques (et plus généralement à l'ensemble des pesticides) présents dans le compartiment atmosphérique, ainsi qu'à l'exposition d'écosystèmes non cibles. Elle consiste en une synthèse des connaissances relatives aux émissions et aux facteurs d'émission de pesticides vers l'atmosphère. Elle a pour objectifs d' :

- 1) identifier et analyser les **facteurs d'émission pour les produits phytopharmaceutiques et les outils de calcul de facteurs d'émission** disponibles à ce jour en examinant leurs utilisations à différentes échelles dans les travaux d'évaluation environnementale (ex. inventaires territoriaux, analyses de cycle de vie) ;
- 2) évaluer l'**adéquation des facteurs d'émission avec les pratiques agricoles françaises actuelles** ;
- 3) identifier et hiérarchiser les **développements** requis **pour améliorer les méthodes de comptabilisation des émissions** de pesticides dans l'air ;
- 4) identifier les **leviers d'action existants déjà activables pour limiter les transferts vers l'atmosphère**.

Il s'agit de fournir un état de l'art sur ces questions aux acteurs de la recherche, du développement agricole, de l'évaluation environnementale et de la décision publique. L'étude vise aussi à proposer (i) des préconisations sur l'utilisation des outils existants de caractérisation des émissions de produits phytopharmaceutiques vers l'air et (ii) des priorités de R&D pour une meilleure prise en compte de ces émissions dans l'évaluation environnementale des systèmes agricoles et des décisions de politiques publiques concernant l'amélioration de la qualité de l'air.

Les pesticides considérés dans cette synthèse sont les **produits phytopharmaceutiques (PPP)** (directive 91/414/CE ¹ abrogée par un règlement européen de 2009 sur les produits phytopharmaceutiques (1107/2009) ou plus communément **produits phytosanitaires, utilisés** principalement pour la protection des végétaux ou produits végétaux **en agriculture** ou dans d'autres secteurs (sylviculture, espaces verts, voiries, jardins des particuliers). Ces produits, consistant en des substances actives (SA)² ou des préparations contenant une ou plusieurs SA et des co-formulants, sont destinés à la lutte contre des organismes nuisibles, à la régulation de la croissance des végétaux ou encore à la conservation des produits cultivés. Au niveau réglementaire cependant, la dénomination « pesticides » couvre au-delà des PPP, des produits antiparasitaires vétérinaires et humains et certains produits biocides. **Seuls les produits utilisés à des fins phytopharmaceutiques dans le contexte agricole ont été retenus dans ce travail.**

Les voies de transferts des PPP vers l'atmosphère examinées dans cette étude sont présentées en section 1.2.2. Ce travail considère aussi les effets de pratiques et de technologies utilisables en agriculture sur les mécanismes et les niveaux d'émissions, ceci afin d'identifier les leviers d'action existants déjà activables pour limiter les transferts vers l'atmosphère. Les puits atmosphériques (dégradation ou dépôt) n'entrent pas dans le cadre de l'étude.

Au-delà des connaissances relatives aux processus d'émission des PPP dans l'air et aux techniques pour les maîtriser, ce travail se penche sur les **méthodes mises en œuvre à ce jour pour estimer ces émissions** et notamment sur les **outils de modélisation** et les **démarches de calcul de facteurs d'émission** disponibles. Les contextes d'utilisation de ces outils et méthodes, en particulier les travaux d'évaluation environnementale (cadastres d'émission, analyses de cycle de vie (ACV)...) sont également considérés. Dans le cas des PPP, les émissions (kg/an) sont généralement estimées sur une zone spatiale donnée, à partir de la quantité de PPP (substances actives) appliquée affectée d'un facteur d'émission (FE) correspondant à la part émise de SA appliquées (en général en %). Les valeurs de FE disponibles, leurs limites et l'adéquation des démarches de calcul d'émissions au contexte actuel des **pratiques agricoles françaises métropolitaines**, et également en condition tropicale (DOM et pays aux conditions pédoclimatiques non tempérées) y sont examinées.

¹ Directive du Conseil du 15 juillet 1991 concernant la mise sur le marché des produits phytopharmaceutiques.

² La liste des principaux acronymes, sigles et abréviations est disponible en fin de document

1.2. Contexte général : les produits phytopharmaceutiques et leurs transferts vers l'atmosphère

1.2.1. La protection des cultures en France (contexte tempéré et tropical) : les utilisations de pesticides en France relativement aux surfaces agricoles utiles et la connaissance des pratiques en cours

La France est au premier rang de la production agricole au niveau européen, avec 28,8 millions d'hectares de surface agricole utile (SAU) : 54% des sols du territoire métropolitain ont un usage agricole. La production végétale française est diversifiée : céréales (blé tendre, blé dur, orge, escourgeon, maïs), oléagineux (colza, tournesol, soja), protéagineux, fruits (pommes, pêche, prunes, poires...), légumes (tomates, carottes, maïs, salade...), production viticole ... (Agreste, 2015). Dans les départements d'Outre-Mer, la SAU couvre de 19 600 ha en Guyane à 42 200 ha à La Réunion. Les principales productions végétales y sont la canne à sucre, le riz, la banane, l'ananas, les agrumes, les tubercules, les tomates, les choux, les salades, les concombres ou encore les pastèques.

L'agriculture utilise 91% des produits phytopharmaceutiques vendus en France (Aubertot *et al.*, 2005). La France est au deuxième rang européen avec 66 659 tonnes vendues, après l'Espagne (69 587 t) et devant l'Italie (49 011 t), mais elle se situe au 9^e rang européen selon la quantité en kilogrammes de substances actives vendues rapportée à l'hectare, avec 2,3 kg/ha (Plan Ecophyto II, 2015). La proportion de surfaces traitées dépend des cultures et des familles de produits. La viticulture et l'arboriculture sont les cultures les plus utilisatrices en quantités de PPP épanchés par hectare avec un nombre moyen de traitements phytopharmaceutiques pouvant aller jusqu'à 35 dans le cas de la pomme en 2011 et en général plus élevé que pour les grandes cultures.

Dans l'ensemble des DOM, un nombre assez limité de produits constitue environ 90% des SA vendues : entre une dizaine en Guadeloupe et Martinique, 15 à La Réunion et 18 en Guyane avec une prépondérance des herbicides. Il est à noter cependant que la situation des DOM est très spécifique puisque ces territoires au climat tropical sont soumis aux réglementations européennes mais souffrent à la fois d'une forte pression parasitaire et d'une pénurie de SA homologuées.

L'agriculture biologique (AB) se caractérise par l'absence de recours à des PPP de synthèse. Les 1,1 millions d'hectares de surface agricole utile (SAU) en AB ou en conversion représentent environ 4% de la SAU française. La part de la SAU consacrée à l'AB est globalement plus élevée dans le Sud de la France. La moitié des surfaces en AB se situe dans 5 régions (Midi-Pyrénées, Pays de la Loire, Languedoc-Roussillon, Rhône-Alpes et Provence-Alpes-Côte d'Azur).

Bien que diverses sources de données existent au niveau national (voir ci-dessous), **il n'y actuellement pas de vue globale que ce soit sur l'utilisation des PPP par type d'application (pulvérisation, traitements de semence...) ou sur le type de matériel d'application utilisé selon le type de culture.** Cette information serait pourtant utile à l'évaluation des émissions vers l'air en France.

Les sources de données en France

Les données concernant les pratiques agricoles émanent de différentes sources complémentaires :

- 1) Le dispositif national d'enquêtes par sondage « Pratiques culturales » mis en place par le ministère en charge de l'agriculture renseigne, tous les 5 ans, la conduite de l'itinéraire technique (pratiques techniques, produits phytopharmaceutiques utilisés, fertilisation). Il est complété par une enquête intermédiaire sur les traitements phytopharmaceutiques (www.agreste.agriculture.gouv.fr). Ces enquêtes peuvent fournir des informations sur les produits utilisés, les doses administrées, le raisonnement (ex : comptage, prise en compte des conditions météorologiques), le type et les réglages du pulvérisateur en viticulture. Elles permettent notamment de calculer des indicateurs de fréquence de traitement (IFT) par cultures et par régions.
- 2) La base de données Agrosyst³ qui est un système d'information dédié à la description et l'évaluation des

³ <https://agrosyst.fr/auth/legal.action;jsessionid=E60C0921150E7E8E9DC953DB12918582.worker1>

systèmes de culture dans le cadre du réseau de ferme DEPHY⁴. Y sont disponibles des informations sur la description des systèmes de culture.

- 3) La Banque Nationale des Ventes des distributeurs (BNV-d) actuellement alimentée par les déclarations des bilans annuels de ventes transmis par les distributeurs aux agences et offices de l'eau. A l'horizon 2016, l'information des ventes des PPP sera rattachée au code postal de l'acheteur, considéré comme l'utilisateur final, afin d'améliorer la précision des données contenues dans la BNV-d. Un projet en cours mené par l'INERIS et l'INRA recherche à spatialiser ces données (fin du projet prévu courant 2016).
- 4) Des projets ponctuels tels que le Projet Pres'Agri'DOM portant sur l'évaluation des pressions agricoles dans les Départements d'Outre-Mer (La Réunion, en Martinique, Guadeloupe et Guyane) dans le cadre de la Directive Cadre sur l'Eau permettent d'avoir une image relativement précise des quantités des différentes matières actives utilisées.

1.2.2. Les transferts de pesticides dans l'air

1.2.2.1 Niveaux de contamination de l'atmosphère et observations en France

Ces 15 dernières années, les mesures des niveaux de contamination de l'atmosphère par les PPP dans les régions françaises sont issues de campagnes d'études ponctuelles par des équipes de recherche mais aussi de campagnes de mesures volontaires menées par les Associations Agréées de Surveillance de la Qualité de l'Air (AASQA). La contamination de l'air par les PPP est avérée : les niveaux de concentrations sont en général de l'ordre de quelques pg.m^{-3} à plusieurs ng.m^{-3} (COP-ORP 2010), voire $\mu\text{g.m}^{-3}$ dans les parcelles traitées. Ce constat s'effectue autant en milieu rural qu'en milieu urbain. Les concentrations observées sont variables selon :

- la distance par rapport à la source ;
- les produits utilisés (et donc les cultures et les pratiques agricoles associées) qui présentent des potentiels d'émission et de persistance atmosphérique variables ;
- les conditions d'application dont les conditions météorologiques ;
- l'usage agricole sur le territoire étudié en fonction du type de cultures sur la région en question.

1.2.2.2 Voies de transfert des pesticides vers l'atmosphère durant et après l'application

Plusieurs procédés d'application des PPP existent mais **la pulvérisation représente 95% des techniques utilisées** (Aubertot *et al.*, 2005). Pour un traitement par pulvérisation, des pertes directes dans l'air peuvent avoir lieu pendant l'application, sous forme d'aérosols liquides et en phase vapeur, mais aussi en post-application, sous forme gazeuse voire particulaire. Ainsi, plusieurs voies de contamination de l'atmosphère sont possibles :

- **une contamination directe pendant l'application** à cause des pertes par dérive (voie 1, Figure 1) et par dispersion de poussières de traitements de semences durant le semis. La définition de « dérive » retenue ici est celle de l'ORP (Observatoire des résidus des pesticides) : « fraction de pulvérisation qui au moment de l'application n'atteint pas la cible (sol ou végétal) ». Portant sur les émissions de PPP dans l'air, **la présente étude se cantonne à la fraction de la dérive qui part vers l'atmosphère (dérive aérienne)**, et non à celle déposée localement en dehors de la zone d'application (dérive sédimentaire, qui est la seule voie généralement retenue pour estimer les « pertes par dérive »).
- **une contamination indirecte en post-application**, telle que :
 - o les pertes par volatilisation depuis le sol ou le couvert traité (voies 2a et 2b, Figure 1)
 - o l'érosion éolienne de particules de sol sur lesquelles des produits peuvent être adsorbés (voie 3, Figure 1)

⁴ Le réseau DEPHY est un réseau de fermes de démonstration, d'acquisition de références, et d'expérimentation de systèmes de cultures économes en produits phytosanitaires, mis en place dans le cadre du plan ECOPHYTO.

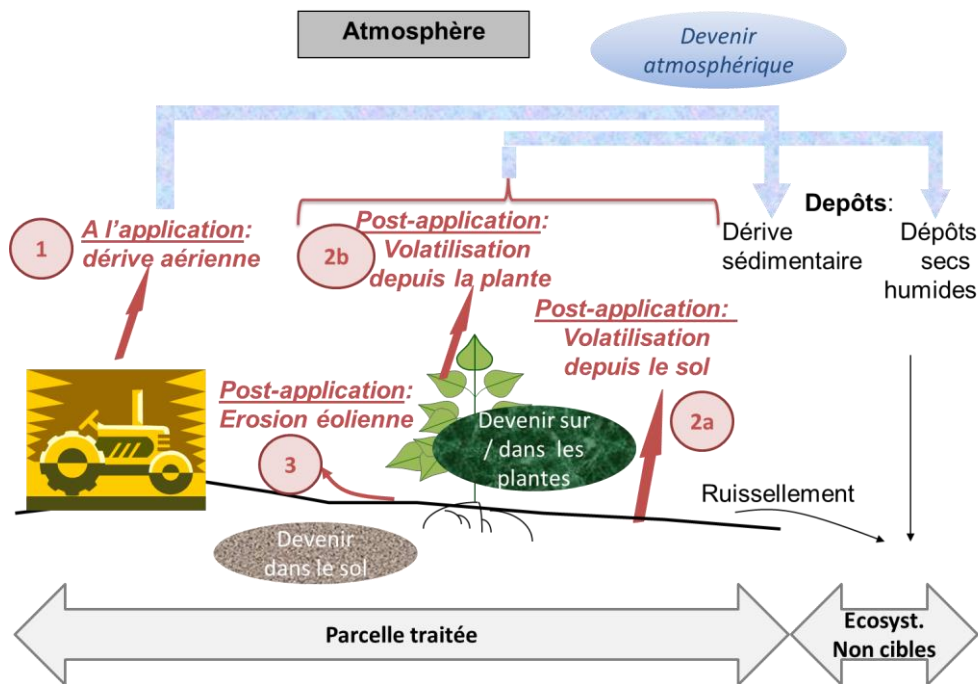


Figure 1 : Voies de contamination dans l'air durant et après application (d'après Bedos *et al.*, 2002). Il est à souligner toute la difficulté qu'il y a à évaluer de manière différenciée la contribution des voies de transfert comme la dérive aérienne, l'évaporation de la matière active depuis les gouttelettes de pulvérisation et la volatilisation depuis la surface traitée dans une parcelle en cours de traitement (selon la durée du traitement, la volatilisation peut débuter avant la fin du traitement de la parcelle entière et donc avant le début des mesures post-application).

Pendant l'application, entre 15 et 40% environ des quantités appliquées peuvent être perdues dans l'air (Gil et Sinfor, 2005). Les principaux facteurs modulant ces pertes vers l'air sont associés (Figure 2) :

- aux technologies d'application utilisées (type de buses et type de pulvérisateur) ;
- aux conditions météorologiques lors des applications (vitesse du vent, pourcentage d'hygrométrie, température) ;
- au type de culture (cultures pérennes ou cultures basses) et les pratiques (Gil *et al.*, 2007)
- à la bouillie (formulation, adjuvants, ...).

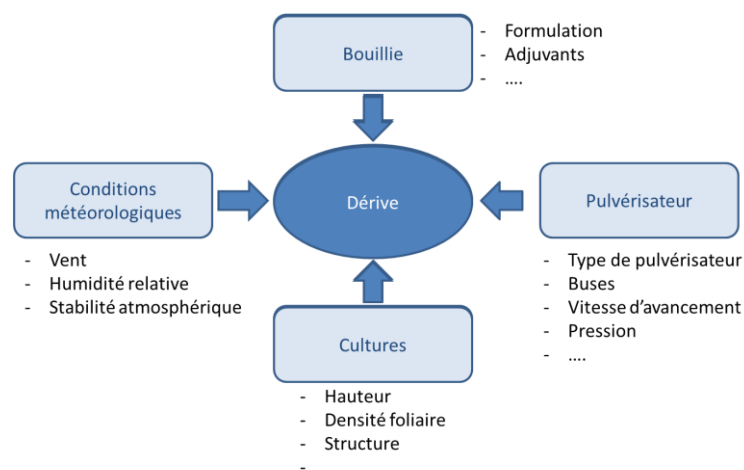


Figure 2 : Facteurs influençant l'émission par dérive.

En post-application, des revues bibliographiques montrent que les flux de volatilisation mesurés dans différentes situations représentent de 0,1% de la dose appliquée jusqu'à

quelques dizaines de % dans certaines conditions sur une durée de quelques jours à quelques semaines (Figure 3) selon :

- la nature physico-chimique de la substance active et la formulation ;
- les pratiques agricoles (mode d'application, incorporation au sol...) ;
- les conditions pédoclimatiques locales ;
- la nature et les conditions de la surface traitée : sol et surfaces foliaires (forme, mouillabilité, stade d'avancement de la culture ou état végétatif des cultures).

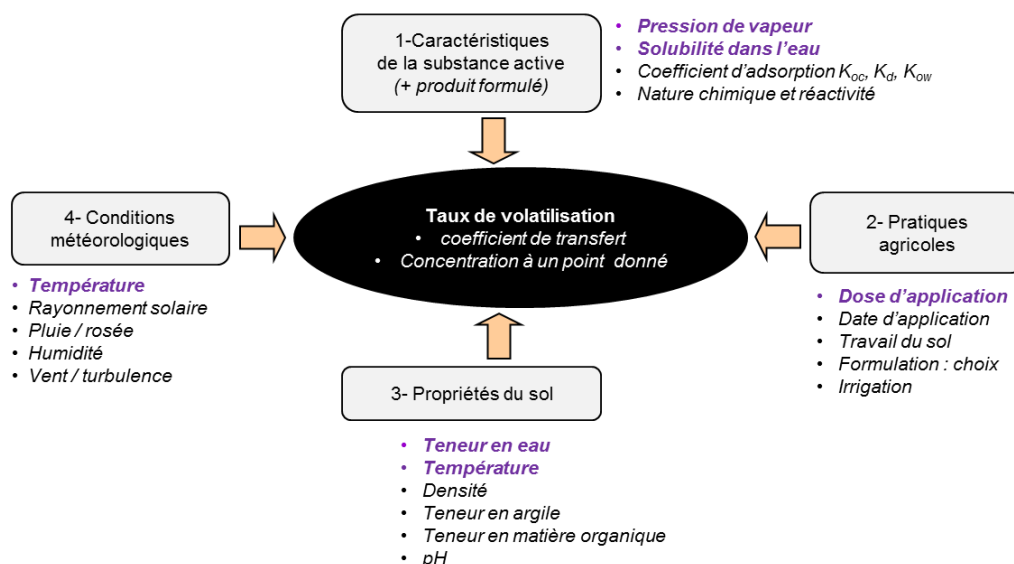


Figure 3 : Facteurs influençant le taux de volatilisation en post-application sur sol nu (les facteurs les plus influents sont signalés en violet).

Une fois émis dans l'atmosphère, les PPP vont être transportés et déposés (soit par voie sèche – gaz, aérosols - soit par voie humide) à différentes distances des sources selon les conditions météorologiques mais aussi selon leur état physique (gaz ou aérosols) et leur persistance dans l'atmosphère. Les circulations atmosphériques à l'échelle planétaire peuvent amener les composés les plus persistants à grande distance, notamment jusqu'aux pôles où les températures basses favorisent leur condensation et leur accumulation.

1.2.3. Le contexte politique et réglementaire (France / Europe)

La présence de PPP dans l'air ambiant n'est pas réglementée. Il n'y a donc pas de contrôle obligatoire ni de valeurs seuils réglementaires. Néanmoins, leur utilisation s'inscrit dans une politique de réduction d'usage et de leurs impacts sanitaires et environnementaux.

Concernant la réduction d'usage, l'objectif de réduction de 50% de l'utilisation des PPP en France en dix ans, défini dans le cadre du plan Ecophyto I, est réaffirmé par le plan Ecophyto II publié en 2015, avec une trajectoire en deux temps, une réduction de : 1) 25% à l'horizon 2020 via la généralisation et l'optimisation des techniques actuellement disponibles, et 2) 50% à l'horizon 2025 via des mutations profondes des systèmes de production et des filières soutenues par des politiques publiques de moyen et long termes et par les avancées de la science et de la technique. Concernant l'application, l'optimisation de la pulvérisation est recherchée via des outils d'aide à la décision développés pour inciter l'ensemble des agriculteurs à prendre en considération l'adaptation des doses à appliquer en fonction de l'état végétatif des cultures, des contrôles de pulvérisateurs renforcés pour de meilleurs réglages ainsi qu'un entretien des matériels de pulvérisation, dans un triple objectif de limitation de la dérive, d'optimisation de la qualité de l'application et de sécurité des utilisateurs. Par ailleurs, un dispositif expérimental de Certificats d'Economie de Produits Phytopharmaceutiques (CEPP) d'une durée de 5 ans est en cours de mise en place. Ce dispositif doit permettre la diffusion par les obligés (distributeurs de produits phytopharmaceutiques) d'actions standardisées de réduction d'usage et d'impact (y compris sur l'air) dans les exploitations agricoles. Ces actions sont proposées par les professionnels, évaluées par une commission d'experts indépendants et peuvent concerner

par exemple l'investissement matériel, le bio-contrôle, les outils d'aide à la décision ou encore la formation.

Concernant la contamination de l'air, il est à noter que le rapport de la Cour des Comptes de décembre 2015 sur les politiques publiques de lutte contre la pollution de l'air préconise qu'un suivi dans l'air des pesticides les plus nocifs soit rendu obligatoire. Dans sa volonté de renforcer la surveillance de la contamination des denrées végétales, de l'eau, des sols et de l'air, et d'évaluer les expositions potentielles des citoyens, le plan Ecophyto II identifie comme prioritaire l'étude des PPP dans le compartiment aérien (Actions 7 – Définir une stratégie nationale de recherche et d'innovation, 11 – Renforcer la surveillance de la contamination des denrées végétales, de l'eau, des sols et de l'air, et 14 – S'appuyer sur des indicateurs d'utilisation, d'impact et d'évolution des pratiques). Cette priorité était déjà clairement identifiée dans le rapport Potier (2015) via l'Action n°19 « Suivre la contamination aérienne ». Dans ce contexte, l'ANSES a été saisie fin 2014 afin de contribuer à la définition d'une surveillance nationale des PPP dans l'air ambiant qui devra permettre d'établir un état des connaissances des niveaux d'exposition de la population. Il est également prévu dans le Plan National Santé Environnement (PNSE 3 ; actions 29 et 30) et la feuille de route issue de la Conférence environnementale des 27 et 28 novembre 2014 (action 72-a), le lancement d'une campagne nationale exploratoire des pesticides dans l'air. Un protocole de surveillance harmonisé doit être établi par le LCSQA-INERIS en s'appuyant sur les recommandations de l'ANSES, sous réserve des financements du plan « Ecophyto II ».

Le plan Ecophyto II identifie également comme axe prioritaire le contexte de l'Outre-Mer avec une volonté de rechercher des solutions spécifiques.

Il est à noter qu'alors que la question de la surveillance de la contamination aérienne par les PPP apparaît clairement dans les politiques publiques, celle de la caractérisation des émissions en lien avec les pratiques agricoles est moins explicite, même si le plan Ecophyto II mentionne que « dans le champ de l'environnement, la stratégie abordera le transfert et le devenir de produits entre compartiments (air, sol, eau) à différentes échelles spatiales et temporelles ». La caractérisation des émissions constitue en effet un élément important de la compréhension de l'impact des pratiques de protection des plantes sur la contamination de l'air, et de l'identification de stratégies d'actions.

1.2.4. Quels sont les besoins en termes de facteurs d'émission des pesticides ?

Les facteurs d'émissions (FE) de polluants atmosphériques sont utilisés dans plusieurs outils d'évaluation des actions mises en œuvre dans le cadre de politiques publiques ou par les acteurs économiques pour réduire les émissions dans l'air. On peut citer :

- les inventaires nationaux et territoriaux ;
- Les outils de diagnostic et d'aide à la décision territoriaux : exemple de Climagri® ;
- les outils de diagnostic et d'aide à la décision à l'échelle de l'exploitation ou de la parcelle ;
- les inventaires de cycle de vie des produits, notamment agricoles et alimentaires ;
- les modèles de prévision de la qualité de l'air et des dépôts atmosphériques.

A chaque type d'utilisation peuvent être associés des besoins en termes de facteurs d'émission spécifiques tels que présentés dans le Tableau 1.

Tableau 1 : Besoins en termes de facteurs d'émission (FE) des pesticides selon leurs utilisations.

Utilisations	Besoins
Représentation qualitative et quantitative des émissions dans le cadre d'un inventaire d'émissions à l'échelle national ou territoriale	FE annuels (et taux d'abattement applicables aux FE) représentatifs d'un territoire donné, associables à des données d'activité sur ce territoire et pour une période donnée
Outils de diagnostic et d'aide à la décision territoriaux : diagnostics polluants atmosphériques	FE annuels représentatifs du territoire ciblé, associables aux données d'activité disponibles Si non disponibles, indicateurs de risques / probabilités d'émissions
Outils de diagnostic et d'aide à la décision à l'échelle de l'exploitation ou de la parcelle : diagnostics polluants atmosphériques ou de risques d'émissions de PPP	FE ou modèles d'émission représentatifs de la situation locale (agropédoclimatique) Si non disponibles, indicateurs
Evaluation d'un produit en analyse de cycle de vie : inventaires de cycles de vie des produits agricoles et alimentaires	FE ou modèles d'émission, idéalement adaptables à tout type de molécules (dont les produits de dégradation), à tout type d'environnement, représentatifs des systèmes de production évalués, cohérents avec les modèles d'impacts
Modèles de prévision de la qualité de l'air et des dépôts atmosphériques	FE ou modèles d'émission adaptés aux échelles spatio-temporelles ciblées (quelques km ² et pas de temps court : heure, jour).

2. Matériel et méthodes

Les résultats présentés ci-après sont le fruit d'une **analyse de la littérature scientifique et technique** inventoriée à partir notamment de bases de données bibliographiques internationales (principalement Cab Abstracts, Agricola, Environment Complete, Scopus) et de catalogues des bibliothèques des universités et de centres de recherche. Cette analyse a bénéficié du **concours de divers experts** issus de différents organismes sollicités soit pour le suivi de l'étude (comité de projet), soit ponctuellement lors de rencontres individuelles, mails ou relecture du document (voir Annexe 1).

Les publications recensées ont été classées en trois catégories : celles décrivant (1) des classes, des facteurs d'émission ou des équations de corrélations empiriques, (2) des modèles ou (3) des mesures d'émissions réalisées ponctuellement au champ. Pour chacun des outils mis en avant, ont été également listées les publications faisant référence à leur utilisation.

Le corpus bibliographique sélectionné et analysé dans la synthèse bibliographique comprend **230 références** hors références en conditions tropicales. Parmi ces références, on compte, outre 49 rapports et notes techniques et 8 thèses, 142 articles de revue, dont 130 sont présents dans la base *Science Citation Index* du *Web of Science (Wos) Core Collection* Thomson et pour lesquels une analyse bibliométrique a été réalisée. Les 5 pays principaux d'affiliation des auteurs (Etats-Unis, Canada, France, Pays-Bas et Allemagne) totalisent 97% des articles. Les organismes de recherche français (INRA et Irstea) figurent dans les 10 premiers organismes d'affiliation des auteurs.

3. Synthèse des résultats

3.1. Les outils d'estimation existants (facteurs d'émission, classes, relations, modèles)

Un gradient de méthodes d'estimation des émissions vers l'air lors de l'application ou après l'application de PPP, allant de facteurs d'émissions simples (ou de niveau 1) aux modèles mécanistes,

en passant par les relations empiriques, a été identifié. Il présente un nombre croissant de facteurs d'influence pris en compte : de la seule pression de vapeur (P_v) à l'inclusion d'autres propriétés physico-chimiques, des conditions pédoclimatiques et des pratiques culturales.

3.1.1. Les facteurs d'émission (FE)

Plusieurs facteurs élaborés pour des contextes agricoles ou des utilisations spécifiques ont été identifiés. Ils sont restitués dans le Tableau 2. **Ces FE sont décrits pour la plupart par leurs propres développeurs comme des facteurs de qualité « pauvre » ou apparaissent comme tels compte tenu du peu d'informations apportées à leur égard et des écarts de valeurs constatés.** Lorsque cela est spécifié, ils s'appuient sur un nombre réduit de mesures effectuées au champ dans des conditions très diverses. Ils tiennent compte d'un nombre très limité de paramètres (P_v , mode d'application, dose d'application), qui sont loin de fournir des FE représentatifs d'une région donnée, dans sa diversité de pratiques et de conditions pédoclimatiques.

Tableau 2 : Tableau récapitulatif des facteurs d'émission de substances actives existants.

Réf.	Approche		FE	Voies ém.	Cond°	T (j)	Loc°	Utilisations
	Type	Tech.						
EPA, 1994	AS		FE= 58% <small>(Pv>13)</small> ou 35% <small>(0,13<Pv<13)</small>	V	C, Pr, Sn, Sc	30 (PA)	USA	Inventaires annuels spatialisées d'émissions à l'échelle régionale (AASQA) Données d'entrée d'un modèle de dispersion
	IS		FE = 5,2% <small>(Pv>13)</small> ou 2,1% <small>(0,13<Pv<13)</small> ou 0,27 <small>(Pv<0,13)</small>					
EEA, 1999			FE = 95% <small>(Pv>10)</small> ou 50% <small>(1<Pv<10)</small> ou 15% <small>(0,1<Pv<1)</small> ou 5% <small>(0,01<Pv<0,1)</small> ou 1% <small>(Pv<0,01)</small>	V (V _{app} ?)	C	NR	EU	Inventaires annuels nationaux (supposés) Inventaires annuels d'émissions des POP à l'échelle des Etats membres de l'UNECE (sauf USA + CA)
Anon., 1996 (cité par Mensink et Linders, 1998)		Toute	FE = 40% <small>(Pv>10)</small>	-	S	NR	NL	
		LVM/ fogging	FE = 35% <small>(1<Pv<10)</small> ou 25% <small>(0,1<Pv<1)</small> ou 15% <small>(0,01<Pv<0,1)</small> ou 5% <small>(Pv<0,01)</small>					
		Autres	FE = 30% <small>(1<Pv<10)</small> ou 10% <small>(0,1<Pv<1)</small> ou 5% <small>(0,01<Pv<0,1)</small> ou 1% <small>(Pv<0,01)</small>					
Dans les inventaires de cycle de vie (ACV)								
Ecoinvent - Nemecek et Kagi (2007)	NR	NR	FE = 0% (100% dans les sols)	-	C	NR	CH, EU	Inventaires de Cycle de Vie
US LCI	NR	NR	FE = 96%	-	C	NR	USA	
USDA LCA Digital Commons	NR	NR	FE = 0% (100% dans les sols)	-	C	NR	USA	
Audsley et al. (2003)	NR	NR	FE = 10%	-	C	NR	EU	

Paramètres

P_v : pression de vapeur (mPa) (*de 20 à 25°C)

NR : non renseigné

Loc° : localisation

PA : post-application

Application (app)

- Technique d'application (en serre) (tech.) : *Low Volume Misting* (LVM)

- Type d'application (type) : AS : application en surface / IS : incorporation dans le sol

Voies d'émission (voies ém.) : volatilisation

pendant application (V_{app}), en post-application (V)

Conditions (cond°) : C : champ, Pr : prairies ; S : sol ; Sc : sol couvert ; Sn : sol nu ; Se : serre

Afin de pousser la réflexion sur l'adaptabilité de ces facteurs d'émission aux usages actuels des PPP en France, les classes de pressions de vapeur (P_v) des substances d'usage plus récent (inventoriées dans la base de données (BDD) de l'outil Sph'Air⁵ de 2008 (L'Hermite et Gouzy, 2009) référencant 516 SA), ont été comparées avec la gamme de valeurs de P_v des substances considérées par EPA pour le développement de FE pour les applications en surface et par EEA (Figure 4).

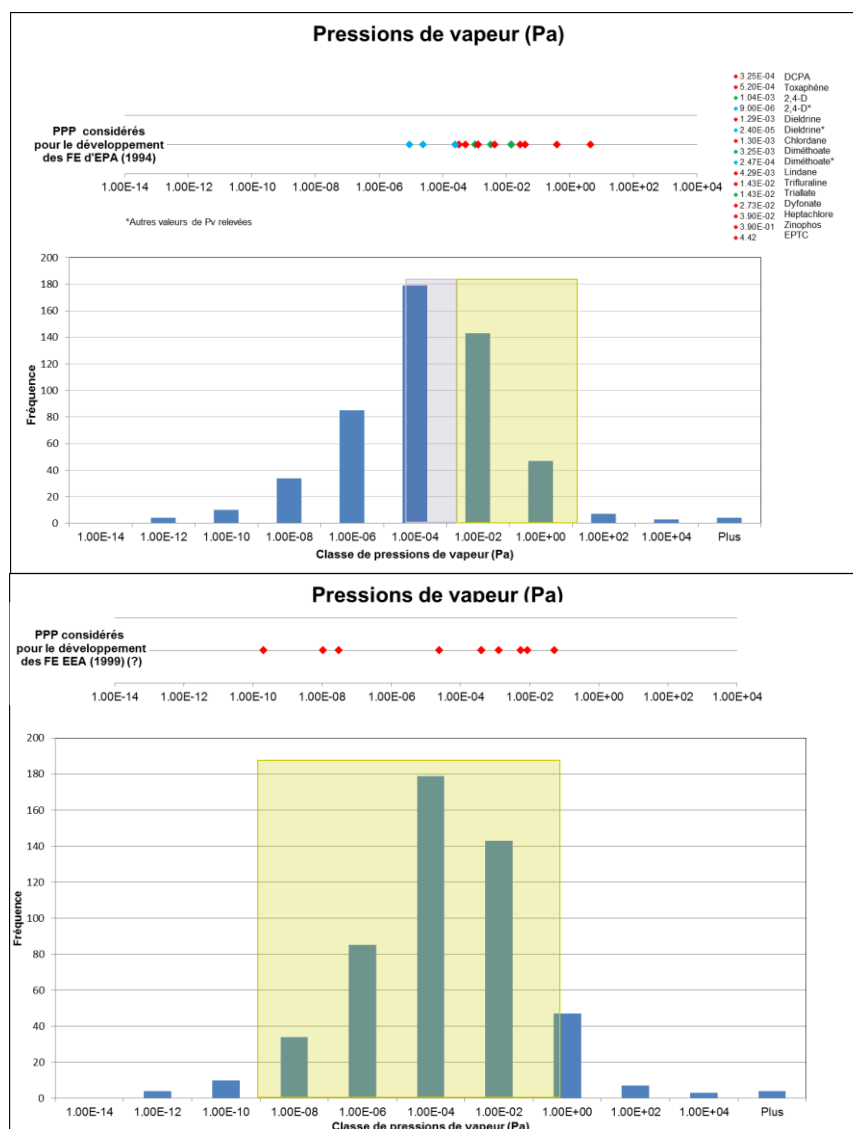


Figure 4 : Histogramme de fréquence pour les pressions de vapeur P_v des substances référencées en 2008 dans Sph'Air et valeurs de P_v pour les substances considérées par EPA (1994) pour le développement de facteurs d'émission pour les applications en surface (en haut) et les valeurs⁶ de P_v des 11 substances citées par EEA (1999) (en bas), gamme représentée par les rectangles superposés sur le graphes (en haut en violet la gamme de valeurs obtenues en ajoutant les valeurs indiquées dans différentes bases de données pour 3 composés) Rouge : interdite à ce jour ; vert : autorisée ; bleu : autre valeur de P_v relevée.

⁵ A la demande du Ministère de l'Agriculture et avec le soutien du Ministère de l'Environnement, l'INERIS a développé l'outil Sph'Air (Gouzy et Farret, 2005) de hiérarchisation des PPP sur des critères de risque (toxicologie, émission vers l'atmosphère, temps de résidence, quantité utilisée) afin d'établir une liste de substances actives à rechercher en priorité dans l'air (aux niveaux national et/ou régional).

⁶ D'après des valeurs (sans indication de température) trouvées dans l'ouvrage *Evaluation de la contamination des sols* (<http://www.fao.org/docrep/005/x2570f/X2570F00.htm#TOC>).

Nous notons, pour les FE de l'EPA, une gamme de valeurs se situant sur des classes de P_v élevées, légèrement plus élevées que la moyenne des substances actives de Sph'Air et, pour les FE de l'EEA, des substances se situant sur les classes de P_v de la majeure partie des SA de Sph'Air. Enfin, la mise en regard des FE développés par l'EPA et proposés par l'EEA (Figure 5) permet de montrer les écarts importants de valeurs selon les références pour des gammes de pression de vapeur « similaires ». Néanmoins, cette figure ne peut être qu'indicative étant donné que la température à laquelle les P_v données par l'EEA ont été établies n'est pas connue.

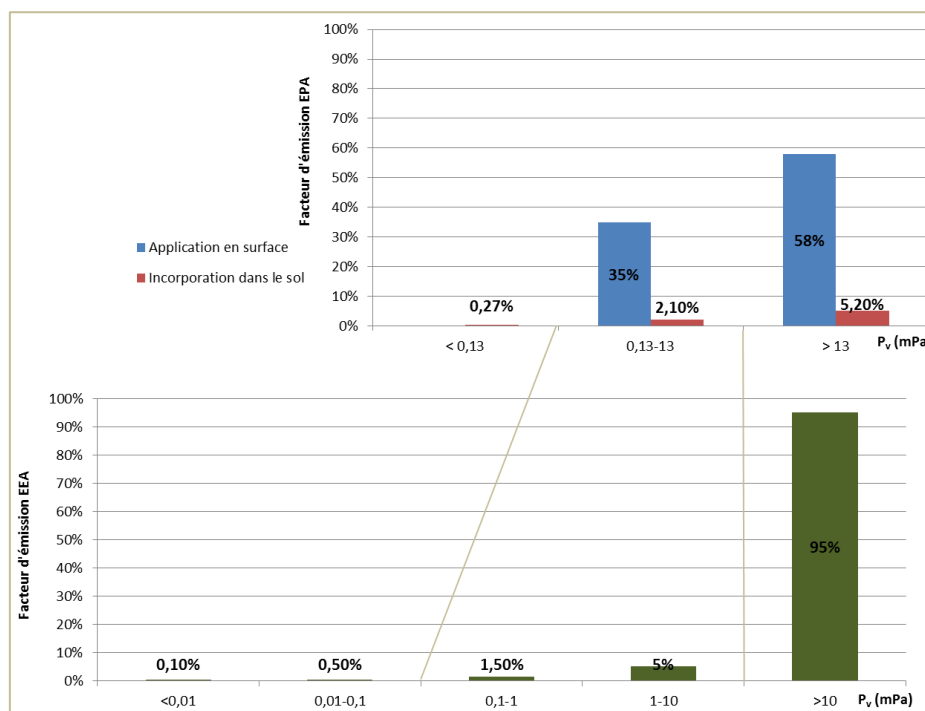


Figure 5 : Mise en regard des facteurs d'émission proposés par EPA (1994) et par EEA (2000).

3.1.2. Relations empiriques

A l'application, une seule étude a été identifiée proposant une relation empirique entre le flux d'émission vers l'atmosphère (dans un plan horizontal à 2,5 m de haut au-dessus d'une parcelle) et les facteurs pertinents gouvernant ce flux (Gil *et al.*, 2007). Cette relation a été établie sur de la vigne à partir d'études menées à l'aide de traceurs. Les facteurs ayant le plus d'effet identifiés sont : le diamètre médian des gouttes pulvérisées, la vitesse du vent, la température de l'air, les conditions de stabilité et l'humidité relative.

En post-application, les principales propositions d'équations de corrélations empiriques relevées dans la littérature pour le calcul de flux de volatilisation (flux instantané ou cumulé) depuis un sol, un couvert végétal ou une surface aquatique traitée sont présentées dans le Tableau 3.

Tableau 3 : Tableau récapitulatif des équations simples pour le calcul de flux bleu : propriétés substance. vert : pratique. Légende des acronymes en page suivante.

Equation...	Réf.	Formule	App.	Sup	Remarques	Variable	Voie ém.	Durée	Sort ie	n	R²	Utilisations		
			T	L										
Décroissance exp.	Raupach <i>et al.</i> (2001)	$Q = Q_{max} \exp(-\frac{t}{T})$		C	P		Q _{max} , T	V		FI				
Equation Knudsen	Tinsley (1979)	$Q = \beta P_v (M/2\pi RT)^{1/2}$	AS		P		P _v , M	V	juste après app.	FI	-	-		
Corrélations de Woodrow	Woodrow <i>et al.</i> (1997)	$\ln(\text{flux}) = 28,355 + 1,6158 \times \ln P_v / (K_{oc} \times S_w)$	AS		S		P _v , K _{oc} , S _w	V	12-24h après app.	FI	15	0,988		
		$\ln(\text{flux}) = 19,35 + 1,0533 \times \ln (P_v \times \text{dose}) / (K_{oc} \times S_w)$ en introduisant la dose d'application	AS		S		P _v , K _{oc} , S _w , dose			FI	≈ 15	0,93		
		$\ln(\text{flux}) = \beta + \alpha \ln (P_v \times \text{dose}) / (K_{oc} \times S_w \times d)$	IS		S		P _v , K _{oc} , S _w , dose, d			FI	NR	NR		
		$\ln(\text{flux}) = 11,779 + 0,85543 \times \ln P_v$	AS		P		P _v				12	0,989	Outil Sph'Air Indicateur de risques I-Phy Air 2	
		$\ln(\text{flux}) = 13,643 + 0,86870 \times \ln P_v / S_w$	AS		E		P _v , S _w			FI	12	0,970		
Méthode Dow	Jansma <i>et Linders</i> (1995)	$K_v = Q \times P_v / K_d \times S_w$	AS		S	sol nu	P _v , K _d , S _w	V	?	FI		USES		
		$K_v = Q \times P_v / S_w$	AS		P		P _v , S _w			FI		USES		
Méthode d'estimation des flux cumulés	Smit <i>et al.</i> (1997)	CV _{normal-moist} = 71,9 + 11,66 log[100FP _{gas}] avec 6,33 10 ⁻⁹ < FP _{gas} ≤ 1	AS	C	Conditions pédo-climatiques fixées	sol normal, humide	FP _{gas} > K _H , K _{oc}	V	21 j.	FC	22	0,76	Indicateur de risques NMI	
		CV _{dry} = 42,3 + 9,0 log[100FP _{gas}] avec 0,2 10 ⁻⁶ < FP _{gas} ≤ 1		C		sol sec	FP _{gas} > K _H , K _{oc}		21 j.	FC	7	0,89		
		CV = 51,1 + 7,2 log[100FP _{gas}] avec 0,8 10 ⁻⁹ < FP _{gas} ≤ 1		Se			FP _{gas} > K _H , K _{oc}		21 j.	FC	35	0,55		
	Smit <i>et al.</i> (1998)	log CV = 1,528 + 0,466 log P _v avec P _v ≤ 10,3 mPa	AS			P	P _v		7 j.	FC	24	0,77		
	Smidt <i>et al.</i> (2000)	log CV = 1,661 + 0,316 log P _v avec P _v ≤ 11,8 mPa	AS	P		P _v				FC	?	?	Indicateur de risques NMI Inventaire d'émissions à l'échelle européenne	
Equation de régression	Wesenbeeck <i>et al.</i> (2008)	$\ln(\text{flux}) = 12,2 + 0,933 \ln P_v$	AS		P		P _v	V		FI		0,98	Modèle PestLCI 2.0	

Paramètres et variables				
B	Coefficient d'évaporation ($1,98 \cdot 10^{-5}$; sans unité)	K_{oc}	Coefficient d'adsorption dans le sol (mL g^{-1})	NR : non renseigné
CV	Volatilisation cumulée (% du dosage)	K_v	Taux de volatilisation (j^{-1})	Sortie : flux instantanés (FI) ou cumulés (FC)
CV (Smidt)	Volatilisation cumulée (% de la quantité atteignant la culture)	M	Masse molaire (kg mol^{-1})	App. : application
d	Profondeur d'incorporation (cm)	P_v	Pression de vapeur (Pa) (ou mPa pour Smit, Smidt)	T : Type d'application
dose	Dose d'application (kg ha^{-1})	Q (Dow)	Coefficient égal à $5,6 \cdot 10^5$ ($\text{mg Pa}^{-1} \text{kg}^{-1} \text{j}^{-1}$)	AS : application en surface
flux (Woodrow)	Flux de volatilisation ($\mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$)	Q (Knudsen)	Flux ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	IS : incorporation dans le sol
FP_{gas}	Fraction de pesticide en phase gazeuse (sans unité)	R	Constante universelle des gaz parfaits ($8,314 \text{ J mol}^{-1} \text{K}^{-1}$)	L : Lieu : C : plein champ ; Se : serre
K_d	Coefficient d'adsorption sur la phase solide du sol ($\text{dm}^3 \text{kg}^{-1}$)	S_w	Solubilité dans l'eau (mg L^{-1})	Supp : Support traité :
K_H	Constante de Henry	T	Température absolue (K)	S : sol ; P : plante ; E : surface aquatique
				Voies d'émissions
				V : volatilisation post-application

Ces relations, simples d'utilisation, ont pour principales variables les caractéristiques physico-chimiques des composés (P_v , S_w , K_H , M, K_{oc} ou K_d) avec, pour certaines d'entre-elles, la prise en compte de la température et des conditions d'humidité du sol ou des pratiques (en termes de dose voire de profondeur d'incorporation). **S'il n'y a pas de verrous conceptuels à utiliser ces relations pour des molécules actuelles quel que soit le lieu d'utilisation, leur fiabilité quant à la prédiction quantitative des flux (et donc au développement de FE) est discutable.** Ces relations sont souvent utilisées pour hiérarchiser les composés selon leur potentiel de volatilisation, ce qui, au vu des sorties des multi-simulations issues de modèles mécanistes (§ 3.1.4), semble cohérent.

3.1.3. Les outils de hiérarchisation

La pression de vapeur d'une SA est un indicateur important de la volatilité d'une substance, les équations de corrélations empiriques développées précédemment lient d'ailleurs pour une large part le taux de volatilisation à sa pression de vapeur. De plus, celle-ci est obligatoirement renseignée par le notifiant lors de la demande d'homologation. Cette donnée est donc disponible, quoique souvent entachée d'incertitude (Leistra, 2011). Ainsi, différentes classes de volatilité des composés sont relevées dans la littérature (3 classes : fortement, moyennement et faiblement ou non volatil). Le Tableau 4 illustre cette démarche dans le cas de la proposition du groupe FOCUS Air (2008).

Tableau 4 : Classes de pression de vapeur citées par FOCUS (2008).

Volatilité des composés	Pression de vapeur (Pa) ($T^{\circ}\text{C}$?)	
	Seiber et Woodrow (1983)	Kördel et al. (1999)
Volatil	$> 10^{-1}$	$> 10^{-3}$
Moyennement volatil	$10^{-5} - 10^{-1}$	$10^{-6} - 5 \times 10^{-3}$
Faiblement ou non volatil	$< 10^{-5}$	$< 10^{-6}$

Toutefois, la méthode consistant à classer les composés selon leur volatilité présente comme inconvénients de ne pas rendre compte des processus d'émission réels, de ne pas apporter d'éléments quantitatifs du transfert et de créer, par l'usage d'une telle classification *a priori*, des « effets de bords ».

A la demande du Ministère de l'Agriculture et avec le soutien du Ministère de l'Environnement, l'INERIS a développé un outil, nommé outil Sph'Air (Gouzy et Farret, 2005), de hiérarchisation des PPP sur des critères de risque (toxicologie, émission vers l'atmosphère, temps de résidence dans l'atmosphère, quantité utilisée) afin d'établir une liste de substances actives à rechercher en priorité dans l'air (aux niveaux national et/ou régional). Au niveau du critère d'émission, les voies de transfert vers l'atmosphère décrites par cet outil sont : 1) le départ direct vers l'atmosphère pendant l'application (à dire d'experts) ; 2) la volatilisation en post-application à partir du sol (utilisant de

simulations issues du modèle BAM décrit ci-après) ; et 3) la volatilisation en post-application à partir de la plante (utilisant des relations empiriques de Woodrow décrites dans le Tableau 3). L'outil Sph'Air présente donc les mêmes limites que celles du modèle BAM (§3.1.4.3) et de la corrélation de Woodrow (§3.1.2). Cet outil est utilisable de l'échelle départementale à l'échelle nationale, en passant par la région administrative. Il est en cours d'actualisation. Sa capacité d'adaptabilité aux DOM sera alors évaluée.

L'indicateur « Phytosanitaires », I-Phy (van der Werf et Zimmer, 1998) est un indicateur qui permet d'évaluer les risques de pollution et d'impact sur la santé humaine liés à l'utilisation des PPP sur la parcelle. Dans l'outil I-Phy Air 2 de la nouvelle version de I-Phy, la volatilité de la substance active est estimée à partir des flux de volatilisation calculés grâce à la méthode de Woodrow *et al.* (1997) à partir d'un sol ou d'un couvert végétal traité. La sortie d'I-Phy se présente sous la forme d'une note et non d'un flux.

3.1.4. Les modèles

Plusieurs types de modèles incluent, ou sont développés pour estimer, les transferts de PPP vers l'atmosphère (Tableau 5).

3.1.4.1 Les modèles utilisés pour l'Analyse de Cycle de Vie (ACV)

Pour réaliser une ACV, il est nécessaire d'estimer les fractions de SA émises dans les différents compartiments environnementaux – air, eau de surface et eaux souterraines - suite à l'application au champ de PPP. Ces fractions sont destinées à être utilisées pour le calcul des émissions dans des Inventaires de Cycle de Vie (ICV), qui sont elles-mêmes nécessaires pour la phase d'évaluation des impacts de l'ACV. **PestLCI** (Birkved et Hauschild., 2006) **est le seul modèle développé avec un objectif d'utilisation en ACV et proposant une modélisation des processus dynamiques en jeu suite à l'application de produits phytopharmaceutiques au champ**. Dynamicrop (Fantke *et al.*, 2011) est un modèle centré sur la plante. Il a pour objectif principal non pas l'estimation des émissions vers les différents compartiments de l'environnement, comme l'air, mais la prédiction des résidus de pesticides dans la partie récoltée de la culture. Il comporte des estimations de pertes à l'application et en post application selon des approches relativement simples. Les approches utilisées pour l'évaluation des émissions vers l'atmosphère dans ces ACV sont du niveau des approches présentées dans les parties 3.1.1 à 3.1.3.

3.1.4.2 Les modèles de fugacité

Ce sont des modèles environnementaux multimédias développés pour une évaluation simple et rapide du comportement environnemental probable des composés chimiques (Mackay et Paterson, 1981). Ces modèles sont basés sur le concept de fugacité, activité thermodynamique d'un composé chimique exprimant sa tendance à s'échapper d'un compartiment ou d'une phase donnée. Il existe quatre niveaux de modèles (I, II, III et IV), grâce auxquels la distribution et le devenir d'un composé chimique sont évalués à partir de ses propriétés intrinsèques dans un environnement générique (aire géographique définie et limitée, composée de phases homogènes) à 25°C. Ces quatre niveaux sont de complexité croissante dans les informations ou les processus pris en compte, apportant une compréhension plus fine du comportement d'une substance chimique dans l'environnement. Les niveaux I et II ne comprennent généralement pas d'estimation de la dérive. Une référence a été identifiée dans laquelle l'implémentation d'un compartiment « gouttelettes » a été introduit dans un modèle de niveau IV afin d'étudier les applications aériennes de pesticides sur forêt. A partir des niveaux III et a fortiori du niveau IV, la classification d'un modèle en modèle de fugacité ou modèle mécaniste environnemental n'est pas triviale. Ainsi, Chahine (2011) classe-t-il les modèles PRZM ou PEM dans les modèles de fugacité.

3.1.4.3 Les modèles mécanistes dédiés à la prédiction des émissions vers l'atmosphère

Nous distinguons les pertes pendant l'application et en post-application. Il est à noter que peu de modèles intègrent à la fois ces deux sources d'émissions (Raupach *et al.*, 2001). C'est d'autant plus vrai que les modèles proposent une représentation fine des processus. La description des processus des pertes à l'application a aussi été davantage appliquée aux cultures pérennes, en particulier les vignes, tandis que celle des pertes en post-application l'a été aux grandes cultures et/ou au sol nu.

○ Pendant l'application

La dispersion aérienne des gouttelettes de pulvérisation est simulée selon essentiellement deux types de paramétrisations⁷ : le panache gaussien ou la modélisation des trajectoires de gouttelettes via des modèles lagrangiens.

- Le modèle **AGDRIFT** (Bird *et al.*, 1997) basé sur AGDISP (modèle lagrangien testé sur des jeux de données) décrit la dérive sédimentaire et la dérive aérienne dans des versions plus élaborées pour des applications par avion ou hélicoptère. Par contre, pour les pulvérisations en grandes cultures et arboriculture, seule la dérive sédimentaire est décrite et ce, à partir de relations empiriques uniquement.
- Le modèle de trajectoire **IDEFICS** (Holterman *et al.*, 1997) calcule en fonction de la distance 1) la distribution dans le sens du vent des gouttelettes déposées sur la parcelle traitée et hors de la parcelle traitée sur le sol (ou sur une surface aquatique) (de 0 à 15 m), et 2) la distribution verticale des gouttelettes encore présentes dans l'air. A noter qu'une fraction de PPP émise pendant l'application est fixée en fonction du type de buses, sans que cette valeur ne soit réellement argumentée.
- Le modèle de **Raupach *et al.* (2001)** simule à la fois le dépôt sur des surfaces aquatiques par dérive sédimentaire et par dépôt gazeux de PPP volatilisé via un modèle gaussien. Ce modèle a été appliqué au cas de l'endosulfan.
- Le modèle à complexité réduite **DRIFT-X** (Brun, 2007) s'appuie sur la décroissance exponentielle de la concentration de produit dans la végétation (vigne) pour calculer les flux verticaux vers l'atmosphère suivant deux étapes : calcul du flux d'air et de concentrations au niveau du pulvérisateur puis devenir du jet pulvérisé dans l'air et la végétation dans la parcelle traitée. Ce modèle a été repris par Bozon et Mohammadi (2009) pour calculer la dispersion horizontale de ces flux dans un plan horizontal, en fonction des conditions de vent et de la topographie du terrain.
- **Une modélisation plus fine des champs de vent au sein d'une parcelle de vigne, comprenant l'effet du jet de pulvérisation sur la dispersion du nuage de gouttelettes à l'échelle du rang de vigne et de la parcelle, ainsi qu'une modélisation de la dispersion à l'échelle du paysage (par couplage avec les travaux issus des développements de Brun (2007) a été proposée par Chahine (Chahine, 2011 ; Chahine *et al.*, 2014) à partir de modèles Large Eddy Simulation (modèle ARPS) couplés à une modélisation lagrangienne de la trajectoire des gouttelettes.** Cet outil permet d'analyser l'effet de facteurs clefs tels que la structure de la vigne ou le type de buse utilisée. Développé pour la vigne, cet outil, dont l'approche est générique, pourrait être adapté à d'autres types de cultures. Cependant, c'est un outil assez lourd à mettre en œuvre et dont la confrontation aux données est encore nécessaire.

○ En post-application

- Le modèle **BAM** (Behavior Assessment Model) a été conçu par Jury *et al.* (1983) comme un modèle de screening destiné à établir des classes de produits chimiques selon leur susceptibilité aux différentes voies de dispersion dans le sol et dans l'air (lessivage, dégradation, volatilisation) dans des conditions pédologiques et environnementales données. **Ce modèle calcule le flux de volatilisation depuis un sol nu sans couvert végétal en considérant la diffusion au travers d'une couche laminaire à la surface du sol avec une résolution analytique des conditions de transfert.** Pour l'air, il classe les pesticides et autres produits organiques volatils en 3 catégories selon la valeur de la constante de Henry K_H : Catégorie I, regroupant les substances très volatiles présentant un $K_H \gg 2,5 \cdot 10^{-5}$; Catégorie II, regroupant les substances intermédiaires présentant un $K_H \approx 2,5 \cdot 10^{-5}$; et

⁷ Il existe aussi les modèles eulériens pour décrire et prédire la dispersion des polluants atmosphériques dans l'atmosphère.

Catégorie III, regroupant les substances peu volatiles présentant un $K_H < 2,5 \cdot 10^{-5}$. Le concept de paramétrisation du flux de volatilisation du modèle BAM a été largement repris dans d'autres modèles.

- Le modèle **PEM** (Pesticide Emission Model) a été développé au Canada (Scholtz *et al.*, 2002) pour décrire la volatilisation de substances actives contenues dans les PPP appliqués au champ, en surface sur le sol ou les couverts végétaux ou incorporés dans le sol avec une approche mécaniste. Il a pour vocation de fournir aux modèles météorologiques de transport de polluants dans l'atmosphère une estimation des taux d'émissions par volatilisation de ces substances en lien avec les conditions météorologiques. **Le modèle PEM a été utilisé pour développer des inventaires d'émissions des PPP par maille à des échelles continentales et globales. A noter que le code source de ce modèle n'est pas disponible.**
- Le modèle **Volt'Air-Pesticides** (Bedos *et al.*, 2009 ; Garcia *et al.*, 2014) est un modèle de volatilisation depuis le sol des SA contenues dans les PPP appliqués au champ adapté du modèle Volt'Air-NH₃. Le modèle **SURFATM-Pesticides** (Lichiheb *et al.*, 2015 ; 2016) est un modèle de volatilisation depuis une surface foliaire des SA contenues dans les PPP appliqués au champ (grandes cultures) adapté du modèle biophysique SURFATM (Personne *et al.*, 2009). Ce dernier adopte une approche mécaniste en décrivant les échanges d'énergie, d'eau et de polluants entre le sol, la végétation et l'atmosphère à l'échelle de la parcelle. Y a été ajouté le calcul de la volatilisation après l'application ainsi que la pénétration dans la cuticule et la photodégradation des SA. Un couplage de Volt'Air-Pesticides et de SURFATM-Pesticides est en cours (Volt'Air-Veg). Ces deux modèles sont développés en France par la même équipe (INRA, UMR 1402 ECOSYS).

PEM ou Volt'Air-Veg apparaissent aujourd'hui comme les modèles les plus performants pour décrire la volatilisation en post-application, bien qu'ils présentent quelques faiblesses pour décrire toutes les cultures ou les pratiques innovantes.

3.1.4.4 Les modèles de transport de solutés dans le sol incluant une description de la volatilisation

Le devenir des PPP dans les sols constituant une préoccupation majeure, notamment à l'égard de la pollution des nappes phréatiques, un certain nombre de modèles décrivant leur comportement dans l'environnement (ex. PRZM, MACRO, PEARL) ont vu le jour depuis plus de deux décennies. Ces modèles sont notamment utilisés pour les évaluations des risques lors des procédures d'homologation pour l'autorisation de mise sur le marché au niveau européen. Pour certains d'entre eux, les développeurs ont introduit un module décrivant la volatilisation afin de compléter le bilan des transferts. Pour se faire, **les paramétrisations choisies se sont basées soit sur les relations empiriques citées plus haut, soit sur la paramétrisation du modèle BAM ou des schémas plus fins, PEARL notamment, basés sur des concepts résistifs proches de ceux employés dans les modèles Volt'Air-Pesticides ou SURFATM-Pesticides.** Ces modèles n'intègrent pas les émissions à l'application.

Tableau 5 : Synthèse des modèles incluant un module de volatilisation ou développés pour estimer les émissions des SA vers l'atmosphère.

Modèles	Emission pendant l'application	Emission en post application	Cultures	Ref
Modèles utilisés en ACV				
PestLCI	Dérive aérienne estimée par dérive sédimentaire pour divers types de cultures $f(x) = A_0 e^{-x/B_0} + A_1 e^{-x/B_1}$	Depuis la plante : cinétique d'ordre 1 à partir relation de Wesenbeeck <i>et al.</i> (2008) <i>En cours de modifications</i> Depuis le sol : cinétique ordre 1 d'après fugacité	Pour émission pendant l'application : sol nu, céréales, betteraves à sucre, fleurs a bulbe, arbres fruitiers avec et sans feuilles, vignes	Birkved <i>et al.</i> Hauschild (2006)
Dynamicrop	Facteur d'émission constant (16.5%)	Basé sur la loi de diffusion de Fick et les travaux de Trapp et Matthies (1998) pour émission depuis le couvert végétal		Fantke <i>et al.</i> (2011)
Modèles de fugacité				
Niveau I	Non	Concept fugacité, à l'éq., cond. stables, syst. clos		Mackay <i>et al.</i> Paterson (1981)
Niveau II	Non	Idem, syst ouvert, + dégradation et advection		
Niveau III	Non	Idem mais hors eq., + transf. intermédiás		
Niveau IV	Un exemple d'implémentation	Idem mais cond. instables		
Modèles d'émission pendant l'application				
AGDRIFT	3 niveaux de complexité croissante : Dérive sédimentaire + profil de concentration dans l'air pour niveaux plus élevés	Non	Application par avion (3 niveaux) Grandes cultures et arboriculture : 1 ^{er} niveau, relation empirique	Bird <i>et al.</i> (1997)
IDEFICS	Trajectoire de gouttelettes Dérive sédimentaire, distribution verticale des gouttes dans air, taux fixe de perte à l'application =f(buses)	Non		Holterman <i>et al.</i> (1997)
DRIFT X, DRIFT-GIS	3 étapes : - flux au niveau du pulvérisateur - dispersion au niveau parcelle - dispersion an aval	Non	Viticulture	Brun (2007) Bozon <i>et al.</i> Mohammadi (2009)
LES	Champ de vent au sein du couvert (ARPS) Dispersion du nuage de pulvérisation dans le rang et à la parcelle avec jet de pulvé. (lagrangien) Dispersion régionale avec couplage modèle ci-dessus	Non	Viticulture	Chahine (2011)
Raupach <i>et al.</i> (2001)	Dispersion gaussienne et vitesse de dépôt	Volatilisation selon une cinétique d'ordre 1 suivi d'une dispersion selon un panache gaussien et concept de vitesse de dépôt	Modèle appliqué à l'endosulfan utilisé en coton	Raupach <i>et al.</i> (2001)
Modèles d'émission en post application				

BAM	Non	Solution analytique de l'équation de convection-dispersion (concept couche laminaire) => flux de volatilisation =f(T, Kh, Koc, DT50sol, θ , E) => 3 classes de volatilisation	Sol nu	Jury <i>et al.</i> (1983)
PEM	Non	Résolution numérique des équations dynamiques d'échange de chaleur, eau, pesticides ; schéma résistif	Sol nu et couvert végétal Traitement de semence	Scholtz <i>et al.</i> (2002)
Volt'Air ⁸	Non	Résolution numérique des équations dynamiques d'échange de chaleur, eau, pesticides ; schéma advectif pour le flux de volatilisation	Sol nu	Bedos <i>et al.</i> (2009)
SURFATM ⁷	Non	Résolution numérique des équations dynamiques d'échange de chaleur, eau, pesticides ; schéma résistif ; description pénétration dans la cuticule	Grandes cultures	Lichiheb <i>et al.</i> (2015, 2016)
Modèle de transport de solutés incluant une description de la volatilisation				
PRZM	Non	<u>Depuis le sol</u> : concept de couche laminaire de BAM, couche d'épaisseur fixe <u>Depuis la plante</u> : cinétique d'ordre 1	Développé pour grandes cultures, utilisés aussi pour vignes et vergers	Carsel <i>et al.</i> (1984)
MACRO	Non	<u>Depuis le sol</u> : Relations empiriques de Smit <i>et al.</i> (1997)	Développés pour grandes cultures, utilisés aussi pour vignes et vergers	Larsbo et Jarvis (2003)
PEARL	Non	<u>Sol nu et couvert végétal</u> : schéma résistif avec pénétration et photodégradation sur la feuille selon une cinétique d'ordre 1	Développés pour grandes cultures, utilisés aussi pour vignes et vergers	Leistra <i>et al.</i> (2001)

⁸ Couplage en cours entre Volt'Air et SURFATM

3.1.4.5 Synthèse des différents outils existants : intérêts, limites, paramètres ?

○ Pendant l'application

Les facteurs influençant la dérive aérienne sont identifiés (Figure 2). Pour rappel, il s'agit 1) des technologies de pulvérisation (y compris le type de buses, ...), 2) des pratiques d'utilisation, variables en fonction des cultures et des bio-agresseurs ciblés, 3) des conditions météorologiques, et 4) des caractéristiques de la bouillie (SA, formulation, adjuvants...).

Divers modèles de dérive existent (Tableau 5), mais ils ont souvent été développés pour estimer la dérive sédimentaire, et non aérienne. Un modèle comme AGDRIFT base son estimation sur des relations empiriques de la dérive sédimentaire pour les applications en grandes cultures et arboriculture. IDEFICS quant à lui, tient compte d'un certain nombre de facteurs (taille des cultures, type de buses, pression, conditions météorologiques, ...). **En l'état, la prise en compte de ces facteurs pour décrire la dérive aérienne spécifiquement ne semble pas suffisante.** Berg *et al.* (1999) estiment toutefois que ces outils pourraient être utilisés moyennant quelques ajustements pour estimer ces pertes. Concernant AGDRIFT, cela semble plausible pour les applications aériennes pour lesquelles le modèle est détaillé mais pas pour les applications en grande culture et arboriculture pour lesquelles AGDRIFT se base sur des relations empiriques de la dérive sédimentaire. **L'approche la plus à même pour analyser l'effet de facteurs essentiels gouvernant la dérive aérienne repose sur les travaux de Chahine (2011) développés pour le cas de la vigne.** De plus, l'extension à d'autres cultures est possible du fait de la généricité de l'approche. Toutefois l'approche est assez lourde à mettre en œuvre et nécessite d'être encore confrontée à des jeux de données.

Ainsi, des verrous forts subsistent pour la caractérisation des flux au niveau du pulvérisateur (même si de nettes améliorations ont été apportées par les travaux de Chahine (2011)), pour l'évaporation de l'eau de la gouttelette (calculée pour l'instant pour une gouttelette constituée uniquement d'eau, sans prise en compte de la formulation) et encore plus de la volatilisation de la SA de la gouttelette.

En ce qui concerne les DOM et les contextes tropicaux en général, la diversité des pratiques en cours et leur spécificité (depuis des modes d'application aériens à des modes d'application manuels avec des pulvérisateurs à dos sur de petites surfaces) nécessitent sans aucun doute le développement de connaissances et d'outils adaptés à ces contextes.

○ En post-application

Les facteurs gouvernant la volatilisation des PPP depuis la surface traitée sont globalement connus. Ils sont répertoriés dans la Figure 3 dans le cas d'une application sur sol nu. La plupart de ces facteurs sont étroitement liés et interagissent entre eux, ainsi leurs effets combinés sur le processus de volatilisation ne sont pas linéaires (Bedos *et al.*, 2002).

Les méthodes d'estimation des flux de volatilisation identifiées tiennent compte de ces facteurs de manière plus ou moins exhaustive (voir Annexe 2 Tableau 10 pour une synthèse) :

- Les FE se basent sur la prise en compte des facteurs de la boîte 1 de la Figure 3 « Caractéristiques de la SA » et essentiellement sur la pression de vapeur (P_v).
- Les relations empiriques se basent également sur ces facteurs (boîte 1), notamment sur P_v , ou le rapport P_v/S_w (i.e. K_H) et/ou un coefficient d'adsorption (la prise en compte des équilibres multiphasiques par certaines relations empiriques comme préconisée par Davie-Martin *et al.* (2013) améliore la pertinence des calculs de flux). Pour certaines relations empiriques, les facteurs regroupés dans la boîte 2 « Pratiques agricoles » sont aussi pris en compte (incorporation et dose appliquée), et une seule relation empirique (Smit *et al.*, 1997) prend en compte les facteurs de la boîte 3 « Propriétés du sol » via la teneur en eau et la température du sol. Ces relations empiriques sont liées aux conditions expérimentales d'obtention des données.
- Les modèles dédiés à la description de la volatilisation intègrent l'ensemble des facteurs regroupés dans les 4 boîtes de la Figure 3 en tenant compte de manière plus ou moins exhaustive de tous les facteurs.

Il est à noter que toute pratique agricole engendrant des modifications de ces facteurs va avoir un impact sur l'intensité ou la dynamique de la volatilisation. C'est le cas en particulier de la présence de résidus végétaux à la surface du sol (mulch) qui, en modifiant les conditions de surface (température, humidité) ainsi que l'adsorption des composés (qui diffère selon qu'ils sont en interaction avec du sol

ou du mulch), modifie l'intensité et la dynamique de la volatilisation. Or les tendances actuelles de non travail du sol engendrent de plus en plus de situations avec mulch, les surfaces sans labour couvrant à l'heure actuelle 35% des surfaces agricoles en grandes cultures (Agreste, 2015⁹). **La prédiction de l'effet du mulch sur la volatilisation reste encore incertaine.** Peu de jeux de données existent et les études y faisant référence présentent des résultats contradictoires (Whang *et al.*, 1993 ; Gish *et al.*, 1995 ; Prueger *et al.*, 1999). Des travaux sont en cours pour inclure la présence de mulch au sein de modèles tels que Volt'Air. Les conditions pédoclimatiques des DOM nécessiteraient des tests spécifiques afin d'évaluer si elles rentrent bien dans les gammes de validité des paramétrisations implémentées dans les modèles (par exemple, les durées de demi-vie des pesticides sous les tropiques semi-arides et semi-humides sont réduites par rapport aux conditions tempérées à cause des températures plus élevées qui favorise la dégradation et la volatilisation des pesticides (Sanchez-Bayo et Hyne (2011) cité par Basset-Mens, 2016)).

Globalement, les modèles dédiés à l'étude de la volatilisation ont plutôt été développés pour des grandes cultures. Leur application en vigne et en arboriculture n'a pas été réalisée. Si les travaux portant sur la pulvérisation en viticulture pourraient fournir la répartition de la pulvérisation à l'application entre le sol et la culture, la prédiction de la volatilisation depuis un couvert épars (tel que les rangs de vignes) n'a pour l'instant pas été testée avec les modèles existants. L'utilisation de ces modèles en arboriculture nécessiterait des développements supplémentaires.

En conclusion (se reporter au Tableau 6 pour une synthèse), nous pouvons dire qu'il existe, en ce qui concerne la quantification des pertes par volatilisation en post-application :

- **des FE développés soit aux Etats Unis (EPA) soit en Europe (EMEP-EEA), qui, s'ils sont faciles à utiliser, présentent un niveau de validation faible** (et aussi sans doute une représentativité réduite en termes de conditions pédoclimatiques et de pratiques). Ils présentent donc un potentiel d'utilisation à faible intérêt en France avec les SA actuelles ;
- **une panoplie de relations « simples »** d'utilisation permettant d'estimer un flux de volatilisation (souvent cumulé sur une période donnée ou instantané moyenné sur une période) à partir essentiellement des caractéristiques physico-chimiques des composés, avec, pour certaines relations, la prise en compte de la température et des conditions d'humidité du sol ou des pratiques (en termes de dose voire de profondeur d'incorporation). **S'il n'y a pas de verrous conceptuels à utiliser ces relations pour des molécules actuelles, quel que soit le lieu d'utilisation, leur fiabilité quant à la prédiction quantitative des flux (et donc au développement de FE) reste à analyser.** Les résultats issus de l'utilisation de ces relations sont notamment liés aux conditions d'obtention des mesures sur lesquelles ces relations ont été construites. Ces relations sont souvent utilisées pour hiérarchiser les composés selon leur potentiel de volatilisation, ce qui, au vu des sorties des multi-simulations d'un modèle mécaniste tel que Volt'Air, semble cohérent ;
- **des modèles de fugacité de complexité variable** ; utilisés notamment dans le modèle PestLCI ;
- **des modèles mécanistes, de complexité variable, pour prédire les flux de volatilisation au champ** (flux à l'échelle horaire pour les modèles dédiés à l'étude de la volatilisation) en tenant compte des principaux facteurs impliqués (en termes de propriétés physico-chimiques, de conditions pédo-climatiques locales, de pratiques). **Ces modèles sont les plus à même de fournir quantitativement des flux de volatilisation. Il faut cependant noter qu'ils sont à l'heure actuelle confrontés à un nombre limité de jeux de données qui permettraient de les évaluer.** Ceci est d'autant plus marqué pour les applications sur couvert végétal, situations pour lesquelles les modèles eux-mêmes sont limités par le niveau de connaissance des processus impliqués (pénétration foliaire notamment) et l'effet de la formulation qui reste peu exploré à l'heure actuelle. Dans l'état actuel des connaissances et malgré ces limites, ces modèles pourraient être utilisés pour analyser statistiquement le flux de volatilisation à partir de multi-simulations sur des scénarios représentatifs des conditions d'utilisation des PPP.

⁹ http://agreste.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/memo15_integral.pdf.

Tableau 6 : Intérêts et limites des outils d'estimation des émissions.

Type	Nature	Entrées	Sorties	Atouts	Limites	Appté pratiq. fr	Utilisations
Classes	emp.	- P _v - K _H	Classes	Facile à utiliser	Pas de flux Limitées à P _v ou K _H Niv. de val. Faible	OUI	Note de volatilité pour la sélection des PPP à risque Outil de hiérarchisation des PPP (Sph'Air) Indicateur de risques environnementaux (I-Phy)
Relations	emp.	P _v , S _w , K _H , K _{oc} Pratiques (dose, d) Cond. pédoclim. données	FI moy ou FC sur x jours	Facile à utiliser Distinction eau/sol/plte	Limité ess ^t aux ptés physico-chim. Niv. de val. faible Dét° de flux indép ^t de la dose appliquée (Woodrow, Knudsen pour la plt)	OUI	Outil de hiérarchisation des PPP (Sph'Air) Indicateur de risques environnementaux (I-Phy, NMI) Inventaire d'émissions à l'échelle européenne Modèles PestLCI, USES
FE des lignes directrices EPA et EMEP/EEA	emp.	P _v	Taux / utilisation	Facile à utiliser Distinction AS/IS (EPA)	Limité à P _v Niv. de val. faible Non adapté pour des évaluations des émissions sur des durées courtes (EPA)/pas d'info pour FE _{EMEP}	≈	Inventaires annuels d'émissions régionaux, nationaux Données d'entrée d'un modèle de dispersion
FE (ACV)		Prop. Physico-chim. Cond. Pedo.clim., tec. Appl.& dose					Inventaires de cycle de vie (ACV)
Fugacité		Prop. Physico-chim, cond. pedo clim	Conc. ds chaque comp. env. + persistance & pot. TLD pour niv. II	Description de tous les comp. env.	Dépend du niveau et des hypothèses		
Modèles d'est. des ém. pdt appl	emp. Ou mec.	Carac. Appl. (pulvé, buse) Cond. mto Type de cultures	Le plus souvent dérive sed. Pour qlq modèles, dérive aérienne (sauf Gil em. Vers l'air	Analyse effet buffer zone dans Agdrit	Niveau de complexité et facilité d'utilisation variable selon les modèles	Plutôt oui	Couplage à des modèles de dispersion atmosphérique pour certains

Modèles d'est. des em. Post appl.	méc.	$P_v, S_w, K_H, K_{OC}, DT50$ Cond. pédoclim. fixes ou variables Pratiques	FI (infra-horaire) ou FC	Prise en compte ppx facteurs (excepté formulation –empirique) Outil prédictif	Nécessite données d'entrée Niv. de val. faible (depuis plte incertitudes ++)	OUI avec prise en compte possible des spécificités des pratiques agr. fr.	Utilisation des sorties dans des Inventaires d'émissions spatialisés Couplage à des modèles de dispersion atmosphérique
Modèles env. (PRZM, MACRO, PEARL)	Méc. ou emp. Selon modèle	$P_v, S_w, K_H, K_{OC}, DT50$ Cond. pédoclim. fixes ou variables Pratiques Configuration du couvert	FI (souvent journalier, sauf PEARL recherche horaire), FC	Existence de scénarios prédéfinis Pluriannuel Processus dans le sol raffiné Communauté d'utilisateurs large	Selon modèles, description volat peut être simplifiée Utilisation plus complexe sur cas d'étude réels Non disponibilité des sources	OUI Développés plutôt pour GC mais utilisé en vigne et arboriculture	

Nature ; emp. : empirique ; méc. : mécaniste. Sorties : FI : flux instantané ; FC : flux cumulé ; moy. : moyenné. Limites : niv. de val. : niveau de validation. AS : application en surface. Cond. Pédoclim. : conditions pédoclimatiques. Dét : détermination. Indép^t : indépendamment. IS : incorporation dans le sol. Plt : plante. Ppx : principaux. Pratiques agr. fr. : pratiques agricoles françaises. Ptés physico-chim. : propriétés physico-chimiques. TLD: Transport Longue Distance

Toutefois, quelle que soit la méthode utilisée, il faut noter **deux points de vigilance** :

- **l'incertitude sur les propriétés physico-chimiques des SA elles-mêmes** : une grande variabilité est observée dans les valeurs estimées pour certaines propriétés physico-chimiques des SA comme par exemple P_v , K_H ou S_w selon les méthodes de détermination mises en œuvre en laboratoire. Concernant P_v , les SA étant souvent des composés semi-volatils, en général peu solubles dans l'eau, les mesures sont complexes à réaliser. P_v dépend aussi de l'état physique de la SA pure à la température ambiante qui peut être solide ou surfondue selon le point de fusion. Quant aux données environnementales de type K_{oc} et DT50, elles sont affectées d'une grande variabilité en fonction des conditions du milieu ;
- **l'effet de la formulation sur la volatilisation** qui reste peu connu à l'heure actuelle.

3.2. Les jeux de données

L'objectif de l'étude étant d'identifier les outils permettant la construction de FE ou d'identifier les données qui permettraient de les évaluer, les mesures d'émission répertoriées concernent essentiellement celles effectuées en conditions réelles au champ. **Il est à noter dès à présent que les mesures d'émission pendant l'application et en post-application diffèrent principalement par 1) l'usage de traceurs pour la dérive aérienne et 2) le suivi des SA dans l'air pour la volatilisation en post-application.**

○ A l'application

Alors que les jeux de données portant sur la dérive sédimentaire sont très nombreux, les données concernant la dérive aérienne sont beaucoup plus rares. Une vingtaine de références a pu être identifiée. En termes méthodologiques, la détermination du flux dans l'air de PPP pendant l'application peut être effectuée principalement soit directement par une capture active de particules, soit indirectement à l'aide de traceurs employés dans la bouillie de pulvérisation sur des collecteurs passifs. Les références identifiées se répartissent équitablement entre les deux méthodes. **Il y a ainsi peu d'informations sur la fraction totale de la dose appliquée qui n'atteint pas la zone cible, et notamment sur les flux dans l'air des microgouttelettes ou des particules de PPP**, difficilement détectables par les collecteurs passifs du fait de leur petite taille. Outre les difficultés méthodologiques liées à la mesure même des flux d'émission, se posent deux questions majeures 1) qu'est-ce qui s'évapore en réalité de la gouttelette : SA, co-formulant, ..., et 2) qu'est-ce qu'une émission vers l'atmosphère : combien de temps cette émission doit-elle rester dans l'air pour être considérée comme telle ?

Aucune référence exploitable n'a pu être identifiée dans le contexte DOM spécifiquement. Les quelques références existantes sur des situations relativement comparables émanent d'Amérique Latine et d'Amérique Centrale, d'Australie, Afrique du Sud, Inde et Philippines. Ces travaux portent essentiellement sur la dérive sédimentaire.

○ En post-application

La mesure directe des flux, désignant le transfert de matière donc de masse par unité de surface et par unité de temps, repose sur la mesure de concentrations ; c'est-à-dire une quantité de matière donc de masse par unité de volume obtenue grâce à un échantillonnage de l'air. **Il est important de noter que jusqu'à peu, aucun analyseur ne permettait de mesurer directement les concentrations en pesticides dans l'air¹⁰.** Ainsi plusieurs étapes sont requises : 1) un piégeage des composés sur un adsorbant solide, en général lors d'un prélèvement actif (c'est-à-dire via un prélèvement d'air grâce à un pompage)¹¹ ; 2) une extraction des composés du piège ; et 3) une analyse souvent en chromatographie en phase gazeuse mais parfois liquide. Les études ici présentées portent sur ce type de démarche. En ce qui concerne la quantification du flux de volatilisation, cette synthèse se focalise essentiellement sur les mesures en conditions réelles au champ par méthodes micrométéorologiques (ou modèle inverse).

¹⁰ Actuellement, des équipes de recherche testent le PTR-MS (*Proton Transfer Reaction – Mass Spectrometry*) pour analyser directement les pesticides présents dans l'air ambiant. Permettant une mesure de concentration à haute fréquence, cet analyseur est très prometteur pour l'avenir.

¹¹ Des capteurs passifs ont été développés pour mesurer la concentration en pesticides dans l'air, mais il ne sont pas utilisés pour l'instant pour la mesure des flux de SA

Ainsi, cette analyse nous montre que **des études régulières depuis les années 90 ont été menées mais en nombre relativement faible**, avec en général une seule étude répertoriée par an jusqu'à un maximum de 8 en 1995 et ce, avec **une grande variabilité de protocoles, notamment en termes de méthodes et de durées de suivi** : de quelques heures à quelques mois, auquel cas le suivi n'est pas continu, avec des fréquences de prélèvement également variables (résultant en général d'un compromis entre les contraintes de la méthode utilisée, les limites de quantification en termes d'analyse chimique qui impose un compromis entre durée de prélèvement et débit de prélèvement, et les coûts d'analyse). **Une majorité de jeux de données porte sur la volatilisation depuis le sol**. Pour les applications sur plante, il s'agit d'applications sur blé, laitue, chou-rave, haricot vert, luzerne, pêcher, betterave, ray-grass, pomme de terre, orge, coton. Nous avons recensé un jeu de données de volatilisation depuis l'eau.

Au total, **ces études portent sur une soixantaine de substances actives différentes** (Figure 6) dont **29 interdites en France** (dont 21 actuellement interdites en Europe), avec 12 études portant sur la trifluraline (composé particulièrement volatil), 11 sur l'atrazine et 9 sur le lindane. Ces trois SA sont actuellement interdites en France (voir Figure 6). **Les substances autorisées actuellement ont en général fait l'objet d'une seule ou deux études**, sauf le triallate avec 11 études, le chlorothalonil et le fenpropimorphe (4 chacun) ou le chlropyriphos (3 études). Ces études ont porté majoritairement sur des herbicides, puis les insecticides et enfin les fongicides. Une large gamme de pression de vapeur a été explorée d'environ 10^{-9} Pa à 10 Pa, avec cependant un plus grand nombre d'étude pour des composés de l'ordre de 10^{-6} , à 10^{-1} Pa (Figure 6).

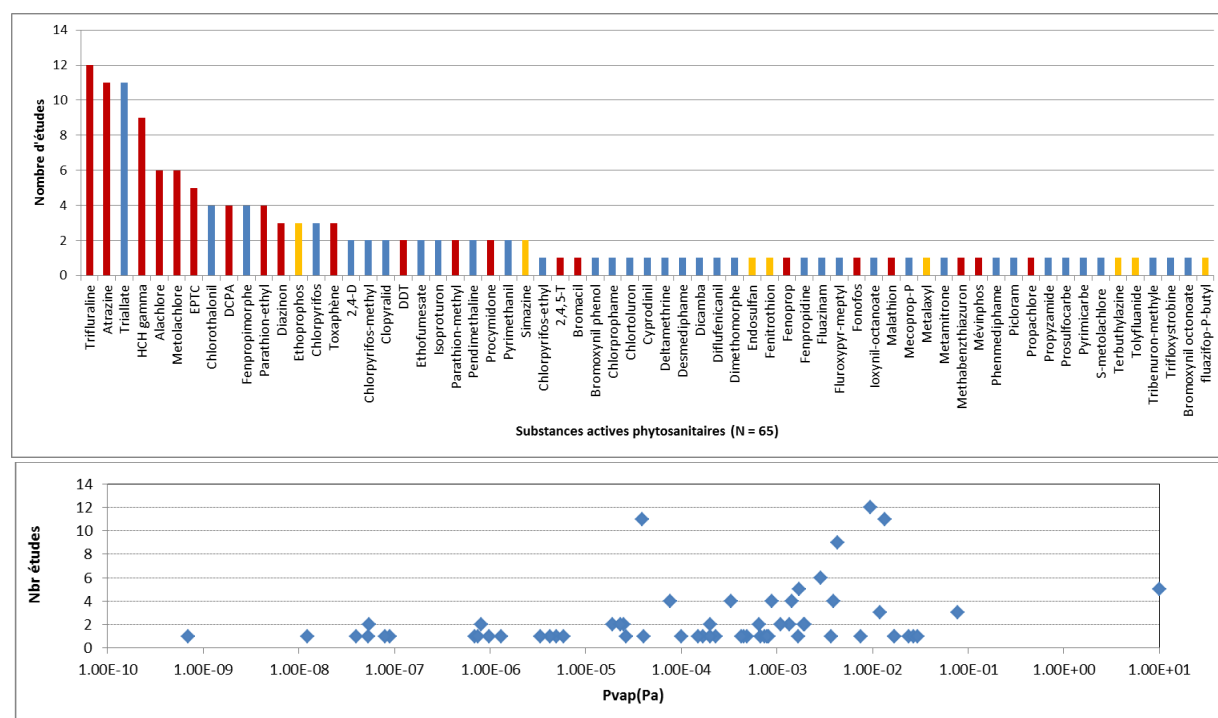


Figure 6 : Synthèse des jeux de données de volatilisation répertoriés : nombre d'études par SA et par valeur de pression de vapeur (P_v). En rouge et jaune, les substances interdites en France. En rouge, les substances interdites en Europe. En bleu, les substances autorisées en France et en Europe.

Aucune référence n'a pu être trouvée pour les DOM, les seules références identifiées en contexte tropical émanant du Brésil, de Thaïlande, Jamaïque et Australie, dont seules deux au champ.

3.3. Les leviers d'action pour limiter les émissions vers l'atmosphère

Lors de cette synthèse bibliographique, nous avons également recherché à identifier les leviers d'action disponibles dans la littérature pour limiter les émissions des PPP vers l'atmosphère (Tableau 7 et Tableau 8). **Comme expliqué tout au long de ce document, les facteurs influençant les émissions pendant l'application et en post-application sont différents. Il est donc naturel d'identifier différents leviers d'action pour chacune de ces voies de transfert.** Une fois que le PPP est dans l'atmosphère, la gestion ultérieure des transferts atmosphériques des fractions émises vers l'atmosphère peuvent quant à elle être mutualisée. Ainsi les Zones Non Traitées (ZNT) dont la mise en place est possible quelle que soit la culture considérée, permettent de réduire le dépôt sur des écosystèmes non cibles, en les éloignant de la parcelle traitée. Les barrières physiques telles que les haies peuvent être assez efficace; cependant, une augmentation des concentrations a pu être observée juste sous le vent de la haie dans certains cas. A noter la possibilité d'utiliser des filets pare-grêle pour limiter la dérive.

Tableau 7 : Leviers d'action pour limiter les pertes vers l'atmosphère à l'application.

MESURES DIRECTES	Réduction	Culture	Remarques	Opportunités et difficultés
<i>Au niveau des équipements et des produits de pulvérisation</i>				
Utiliser des appareils confinant la pulvérisation (panneaux récupérateurs)	++++	Vigne	Dépôts plus importants sur le végétal et pertes dans l'air (et sur les sols) moindres. La bouillie excédentaire est récupérée au lieu d'être perdue dans l'environnement. Cela permet une économie de PPP de l'ordre de 30 à 40% en vigne sur une saison et limite la pollution de l'environnement.	Problèmes d'encombrement de ce type de matériel (risque d'accrochage, difficulté à manœuvrer en bout de parcelles). Allongement des temps de chantier, coût plus élevé des pulvérisateurs à panneaux récupérateurs par rapport à des appareils classiquement utilisés (ex : aéroconvecteurs ou voûtes pneumatiques)
Utiliser des appareils limitant la distance buse/cible (dispositifs de traitement face par face)	++	Vigne/arbo	Dépôts plus importants sur le végétal et pertes dans l'air moindres	En viticulture, appareils moins maniables que les voûtes ou aéroconvecteurs (risques d'accrochage), allongement des temps de chantier.
Utiliser des buses appropriées (produisant des gouttelettes > à 100µm) en particulier utilisation de buses anti dérive (à injection d'air par exemple)	+	Toutes cultures	Dépôts plus importants sur le végétal et pertes dans l'air moindres	Des débats sont toujours en cours concernant d'éventuelles pertes d'efficacité sur certains bioagresseurs liées à la production, par ce type de buses, de gouttes ayant des diamètres plus importants que les buses classiques
Utiliser des appareils limitant la distance buse/cible (dispositifs de traitement face par face) et équipés de buses anti-dérive	+++	Vigne/arbo	Dépôts plus importants sur le végétal et pertes dans l'air moindres	Appareils moins maniables que les voûtes ou aéroconvecteurs (risques d'accrochage), allongement des temps de chantier et questions sur l'efficacité des buses anti-dérive sur certains bioagresseurs. Suivant les réglages, les pertes au sol peuvent être très importantes.
Opter pour une pulvérisation avec assistance d'air		Vigne/arbo	Amélioration la pénétration de la bouillie à l'intérieur du feuillage et la couverture des feuilles en particulier sur les faces inférieures des feuilles et donc potentiellement augmentation de l'efficacité du produit sur les bioagresseurs	Si le flux d'air est trop important par rapport au volume et à la densité de végétation à traiter, les pertes vers l'air et au sol peuvent être très importantes
Utiliser des adjuvants ¹² ayant la mention « limitation de dérive »	+/- f(spécialité commerciale avec laquelle	Grandes cultures	Au cas par cas	Fonction de la formulation du produit

¹² L'analyse des références existantes sur les effets des adjuvants sur les émissions dans l'air à l'application pourrait être approfondie.

	l'adjuvant est associé)			
<i>Au niveau des pratiques d'application</i>				
Diminuer la hauteur de la rampe	++	Grandes cultures		Risque d'accrochage avec les rampes de grandes dimensions à vitesse élevée
Réduire la vitesse d'avancement du pulvérisateur	+	Toutes cultures	Vitesse optimum < 6-8 km/h, mais pour diminuer les temps de chantiers, les tendances sont à l'augmentation de la vitesse d'avancement aussi bien en grandes cultures qu'en viticulture et arboriculture	Temps passé
Réduire le flux d'air	+/-	Arbo	Il faut arriver à réduire la dérive aérienne sans affecter l'homogénéité des dépôts sur le végétal. Etendue de la réduction fonction des conditions de vent et de la densité d'arbres.	Plume de pulvérisation plus vulnérable aux vents transverses réduisant la pénétration de pulvérisation. L'idéal serait de pouvoir ajuster le flux d'air en fonction de l'architecture du végétal et de la porosité mais sur la plupart des pulvérisateurs commerciaux il n'est pas possible d'ajuster précisément le flux d'air.
Bien régler le pulvérisateur pour que les jets de pulvérisation atteignent la cible afin de limiter au maximum les pertes. Adapter les réglages en fonct. du développement végétatif de la plante	+++	Vigne/arbo /maraichag e		Certains appareils de pulvérisation ne sont pas faciles à régler
Informier & former les agriculteurs sur le fonctionnement des matériels de pulvérisation	++++	Tts cult. mais plus particulière ment cult. perennes	L'ensemble des techniciens en agroéquipement constatent que la plupart des agriculteurs ne connaissent pas le fonctionnement de leur pulvérisateur et ne savent pas régler correctement leurs pulvérisateurs	Peu de conseils en agroéquipement sur le terrain
<i>Au niveau des conditions météorologiques</i>				
Traiter en conditions atmosphériques stables ¹³	+	Toutes cultures	En conditions atmosphériques instables, le panache de pulvérisation est plus large et la quantité de liquide de pulvérisation partant vers le haut plus importante	Contraintes liés à l'organisation des chantiers Attention, les applications en conditions stables peuvent générer des concentrations dans l'air plus élevées qu'en conditions instables et avoir des conséquences en

¹³ Pour reprendre les propos de Gil (2007), une atmosphère est dite stable lorsque « la température du sol est inférieure à la température de l'air au-dessus, le flux de chaleur sensible est alors dirigé vers le sol et il y a destruction de la turbulence dynamique. Cet état est caractérisé par la présence de cieux clairs et calme (nuit). Le mélange est peu turbulent et il y a une accumulation des polluants dans les basses couches de l'atmosphère. Le risque que les pesticides se déposent en dehors la cible est alors important (PISC, 2002).

				termes d'exposition sanitaire pour les travailleurs et les riverains
Traiter en conditions de vent faible ($v < 10-15$ km/h)	++	Toutes cultures		Il est interdit de traiter par vent supérieur à 19 Km/h (3 sur l'échelle de Beaufort) Contraintes liés à l'organisation des chantiers
Traiter tôt le matin ou en fin de journée en conditions de température faible et d'humidité relative de l'air forte	+++	Toutes cultures	Il faut absolument éviter les traitements par fortes chaleurs $> 25^{\circ}$. L'augmentation de $T^{\circ}C$ et la diminution du % d'hygrométrie conduisent à une augmentation très importante du taux d'évaporation de l'eau de la gouttelette	Action qui permet de mieux atteindre la cible. En effet, si la gouttelette est petite, la température de l'air élevée et l'hygrométrie faible, elle risque de s'évaporer avant d'atteindre la cible.

Tableau 8 : Leviers d'action pour limiter les pertes vers l'atmosphère en post application. Le nombre de travaux réalisés reste cependant insuffisant pour conclure à l'efficacité de ces leviers d'action pour l'ensemble des composés chimiques et des conditions environnementales.

Mesures	Remarques	Références
<i>Au niveau des produits de traitement</i>		
Recours à des produits de substitution moins volatiles	Complexe car l'effet de la formulation mal connu	
Réduction de la dose appliquée	La diminution des doses engendrent une moindre contamination de l'environnement en général	Robert <i>et al.</i> (2015) ¹⁴
Choix de la formulation	Usage de produits encapsulés ou granules (mais peu de références)	Turner <i>et al.</i> (1978) ; Gish <i>et al.</i> (1995)
	Formulation favorisant la pénétration foliaire de produits systémiques	Lichiheb <i>et al.</i> (2015)
<i>Au niveau des pratiques</i>		
Incorporation des produits phytopharmaceutiques dans le sol	Effet positif observé de l'incorporation sur la réduction de la volatilisation de la trifluraline	Bedos <i>et al.</i> (2006)
Traitement sur résidus de culture (soit sur des terres où travail réduit du sol)	Effet contradictoire observé de la présence de mulch sur la réduction de la volatilisation	+ : Gish <i>et al.</i> (1995) – Traitement au sol - : Whang <i>et al.</i> (1993) Contrasté : Prueger <i>et al.</i> (1999) – Traitement herbicide préémergent
Prise en compte du développement du couvert végétal pour optimiser l'interception de la pulvérisation		Robert <i>et al.</i> (2015)
<i>Au niveau des conditions météorologiques</i>		
Heure d'application en conditions de température faible	Complexe : Volatilisation augmentant avec la température mais attention aux conditions d'humidité (sol, plante)	Effet de l'humidité sur couvert végétal : Houbraken <i>et al.</i> (2015), sur sol : Garcia <i>et al.</i> (2014)

¹⁴ <http://www.programmepesticides.fr/Pages-projets/APR-2009/ECHAP>.

4. Conclusion - Les priorités opérationnelles

Ce travail, issu d'une synthèse bibliographique et de consultations d'experts du domaine, permet de dresser un état des lieux des connaissances actuelles et des outils disponibles concernant les émissions de produits phytopharmaceutiques (PPP) vers l'atmosphère. Il en ressort un certain nombre de constats et de besoins que nous tâcherons de prioriser.

4.1. Niveau de connaissances

4.1.1. Sur les modes de transferts vers l'atmosphère et les facteurs les gouvernant

Les voies de transferts des PPP vers l'atmosphère sont connues : 1) pertes à l'application, 2) pertes en post-application par volatilisation depuis les surfaces traitées (sol/plante) ou par érosion éolienne. En préambule de ce travail, il s'est avéré important de s'accorder sur les contours recouverts par la terminologie « pertes à l'application » et notamment sur la terminologie de dérive. En effet, la dérive est le plus souvent entendue comme la « dérive sédimentaire » c'est-à-dire le départ des gouttelettes de pulvérisation en dehors de la parcelle traitée au moment de l'application, suivi de leur dépôt à proximité de la parcelle traitée. **Nous avons convenu de nous intéresser dans le cadre de cette étude à la dérive aérienne, qui représente la fraction de composé partant vers l'atmosphère au moment de l'application (elle englobe donc la dérive sédimentaire).** L'érosion éolienne (transport de particules de sol – soulevées par le vent - sur lesquelles du pesticide peut être adsorbé) est considérée comme négligeable dans le contexte pédoclimatique français. Cependant, nous n'avons pas approfondi cet aspect dans le cadre de cette étude. De même, le transport de particules issues de traitements de semences n'a pas été considéré. Les études répertoriées dans ce travail se sont essentiellement basées sur les applications par pulvérisation, les plus courantes. De même, nous nous sommes focalisés sur les SA et non sur l'émission des solvants, adjuvants ou co-formulants. Enfin, si l'évaluation de l'interception de la pulvérisation par le couvert végétal est de première importance pour estimer la distribution de l'application entre le couvert et le sol notamment et donc la distinction entre volatilisation depuis le sol et la plante, cet aspect n'a pas été développé ici. Des méthodes existent, souvent basées sur la prise en compte de l'indice de surface foliaire (LAI) mais une étude plus approfondie serait nécessaire.

Les facteurs influençant la dérive aérienne ou la volatilisation sont identifiés. Pour les pertes à l'application, il s'agit : 1) des technologies de pulvérisation (y compris type de buses, ...), 2) des pratiques d'utilisation, variables en fonction des cultures et des bioagresseurs ciblés, 3) des conditions météorologiques, et 4) des caractéristiques de la bouillie (SA, formulation, adjuvants...). Quant aux pertes par volatilisation, les facteurs influents sont : 1) les caractéristiques des SA et des formulations, ainsi que la présence d'adjuvants, 2) les pratiques agricoles, 3) les conditions de surface (sol ou couvert végétal), et 4) la météorologie locale. Les facteurs influençant la dérive aérienne ou la volatilisation ne sont donc pas toujours de même nature. **Il faudra donc a priori développer des facteurs d'émission adaptés à chaque voie d'émission et qui intègrent les facteurs influents pertinents pour chacune de ces voies.** Les leviers d'action pour limiter les pertes pourront donc aussi être différents. De plus, la contribution relative des différentes voies est difficile à évaluer de manière générale car elle va dépendre des conditions d'application et du milieu. **Il est important de noter que l'évaluation de la dérive aérienne reste encore difficile,** la plupart des travaux ayant plutôt porté sur la dérive sédimentaire pour des raisons d'exposition des écosystèmes non cibles situés à proximité des parcelles traitées.

Le niveau de connaissances est très hétérogène entre les cultures. Pour la dérive sédimentaire, les principales cultures ont été explorées (grandes cultures, viticulture, arboriculture) alors que pour la volatilisation, l'essentiel des travaux a porté sur les grandes cultures (et plutôt sur sol nu, même si la volatilisation depuis quelques cultures ont fait l'objet d'études). Il y a peu d'information sur la volatilisation en viticulture ou arboriculture.

4.1.2. Sur les pratiques influençant les émissions

Quelles que soient les voies d'émission, **les pratiques culturales vont influencer l'intensité voire la dynamique de ces émissions des pesticides soit directement, soit indirectement via les modifications du milieu. La connaissance fine du déploiement de ces pratiques en France est donc primordiale.** Il serait important d'analyser si les sources d'information, notamment les enquêtes menées à l'heure actuelle par le ministère en charge de l'agriculture, sont assez complètes pour renseigner toutes les informations requises et sinon, de les adapter.

4.1.3. Sur les leviers d'action

Comme indiqué plus haut, **les leviers sont identifiés séparément pour les pertes à l'application et en post-application.**

Pour les pertes à l'application : les leviers identifiés ont été principalement évalués pour réduire la dérive sédimentaire. Ils portent sur 1) les équipements (appareils confinant la pulvérisation, limitant la distance buses/cible, types de buses) et les produits (ajout d'adjuvants), 2) les modalités d'application (hauteur de rampe, vitesse d'avancement du tracteur, réduction du flux d'air, nombres de rangs traités par passage en viticulture ..., et 3) les conditions météorologiques pendant l'application (vent hygrométrie, température, ...). Il serait intéressant d'analyser si ces leviers permettent aussi de réduire la dérive aérienne.

Pour les pertes en post-application : les leviers d'actions identifiés sont moins nombreux que ceux pendant l'application, et ont généralement fait l'objet d'un nombre de travaux insuffisants pour en quantifier l'efficacité sur les émissions. La **substitution par des composés moins volatils est un des premiers leviers**, encore faut-il savoir évaluer de manière fiable les potentiels de volatilisation. Pour une SA seule, sans contact avec une surface, le potentiel de volatilisation est relié à sa pression de vapeur. Par contre, dans une situation réelle, l'évaluation de ce potentiel est plus difficile car il va dépendre de sa formulation et des interactions avec la surface d'application. **Ainsi, il est nécessaire de développer l'évaluation de la substitution des composés en considérant l'ensemble de la formulation des produits apportés. L'efficacité de l'addition d'adjuvants doit aussi être évaluée. La réduction de la quantité de SA appliquée devrait aussi engendrer une moindre émission. L'optimisation de l'interception de la pulvérisation par le couvert végétal en fonction de l'architecture du couvert pourrait permettre de diminuer les doses des PPP tout en gardant une bonne efficacité du traitement. L'incorporation au sol réduit de manière significative la volatilisation des PPP apportés au sol. Enfin, les préconisations en termes d'heure d'application dans la journée ou de conditions pédoclimatiques et météorologiques ne sont pas encore claires**, des effets contradictoires pouvant être constatés. Si les conditions de stabilité peuvent permettre de diminuer les flux d'émission, elles peuvent engendrer un confinement des composés émis et générer ainsi des niveaux de concentrations dans l'air élevées. **Il faut donc être vigilant à la convergence des préconisations.**

Que cela soit pour les pertes à l'application ou en post-application, **l'aménagement de zones non traitées** (arborées ou non) permet de réduire l'exposition d'écosystèmes non cibles situés en aval des parcelles traitées.

4.2. Outils pour estimer les émissions, et leur capacité à fournir des facteurs d'émission

4.2.1. Les facteurs d'émissions (FE)

L'EPA et l'EMEP (EEA) ont proposé des FE de PPP vers l'atmosphère selon des méthodologies dont le niveau de description n'est pas toujours suffisant pour permettre une bonne évaluation de leur pertinence. Basés essentiellement sur la pression de vapeur des SA, ces FE proposent des valeurs d'émission (en général par volatilisation même si une incertitude pèse sur les FE de l'EMEP (EEA) qui peuvent inclure les pertes à l'application) selon des classes de pression à partir de données expérimentales (ou de simulation

avec un modèle pour l'EPA et des applications sur sol nu) en général hétérogènes en termes de conditions et portant sur des SA anciennes pour la plupart interdites à l'heure actuelle. A noter que les gammes de pression de vapeur des SA utilisées pour développer les FE de l'EPA sont légèrement plus élevées que celle des composés utilisés actuellement. En revanche, la gamme des valeurs des SA utilisés par l'EMEP (EEA) est plus cohérente avec les SA utilisées actuellement. **Si les FE de l'EMEP (EEA) et de l'EPA sont faciles à utiliser, ils présentent un niveau de validation faible et donc un potentiel d'utilisation en France avec les SA actuelles que l'on peut qualifier de faible.** En outre, aucun interlocuteur travaillant sur ces FE n'a pu être identifié dans le groupe EMEP. Quant à l'EPA, il semble que des évolutions soient en cours, mais surtout en termes d'émissions de COV en lien avec les PPP, sans que nous ayons réussi à avoir des précisions sur ces évolutions. La dérive aérienne ne semble pas intégrée dans ces FE (avec une incertitude quant à sa prise en compte dans les FE d'EMEP).

4.2.2. Les relations simples

Pendant l'application, une seule étude a été identifiée pour l'élaboration d'une relation empirique entre le flux de gouttelettes à travers un plan horizontal à 2,5 m de haut au-dessus de la parcelle et des facteurs identifiés comme gouvernant ce flux dans le cas d'une pulvérisation en vigne.

En post application, une panoplie de relations « simples » d'utilisation permet d'estimer un flux de volatilisation (souvent cumulé sur une période donnée ou instantané moyenné sur une période) à partir essentiellement des caractéristiques physico-chimiques des SA, avec, pour certaines relations, la prise en compte de la température et des conditions d'humidité du sol ou des pratiques (en termes de dose d'application voire de profondeur d'incorporation). **S'il n'y a pas de verrous conceptuels à utiliser ces relations pour des SA actuelles quel que soit le lieu d'utilisation, leur fiabilité quant à la prédiction quantitative des flux (et donc au développement de FE) reste à analyser.** Ces relations sont notamment liées aux conditions d'obtention des mesures sur lesquelles elles se basent, parfois obtenues en laboratoire en conditions éloignées de la réalité des applications au champ. De plus, il demeure une incertitude forte sur les caractéristiques physico-chimiques. Ces relations sont souvent utilisées pour classer les composés selon leur potentiel de volatilisation ; ces classements, au vu des comparaisons avec des sorties de multi-simulations de modèles mécanistes, semblent cohérents.

Les outils de classification ne fournissent pas de valeurs quantitatives de flux. En ce sens, ils ne permettent pas de fournir un FE (surtout les méthodes basées sur la pression de vapeur seule). Cependant, dans le cas de Sph'Air ou d'Iphy-2, leur classification est basée sur un calcul des flux d'émission (pour Sph'Air, calcul des pertes à l'application à dire d'experts, de la volatilisation depuis le sol à l'aide du modèle BAM et depuis la plante à l'aide de relations empiriques évoquées plus haut ; pour Iphy-2, calcul de volatilisation selon les relations empiriques citées plus haut). **L'évaluation des pertes à l'application de Sph'Air pourraient donc servir de base pour des calculs de facteurs d'émission.** A noter que ces deux derniers outils ont été développés en France, donc pour un contexte agricole français, avec, dans le cas de Sph'Air, une liste assez exhaustive et actualisée des PPP utilisés en France.

4.2.3. Les modèles mécanistes

Pour les pertes à l'application, des modèles de dérive sédimentaire existent, surtout empiriques. Des développements de modèles mécanistes notamment en viticulture ont été réalisés à l'aide d'outils numériques complexes. **Il y a un fort besoin de développer des modèles pour la dérive aérienne et plus spécifiquement pour les DOM pour lesquels il faudrait développer des modèles adaptés aux pratiques en cours.**

Pour les émissions par volatilisation, des modèles permettent de décrire les processus à une échelle temporelle relativement fine. Prenant en compte les principaux facteurs influents, hormis l'effet de la formulation qui continue à être un verrou, ils représentent globalement bien les observations. Toutefois, ils sont confrontés à un manque crucial de jeux de données pour élargir la gamme de conditions et de SA testées. Par ailleurs, plutôt développés dans des contextes de grandes cultures, leur utilisation en viticulture et arboriculture, ou pour les cultures en contexte tropical, nécessite des tests, voire des adaptations. **Ces modèles pourraient être utilisés pour fournir des facteurs d'émission via une démarche de méta-modélisation** (multi-simulations sur un grand nombre de scénarios et analyses statistiques pour générer

des FE intégrant les facteurs pertinents). **Certains de ces outils ont déjà été utilisés pour produire des inventaires spatialisés d'émissions (ex : modèle PEM aux Etats-Unis).**

Les modèles de fugacité présentent l'avantage de représenter tous les compartiments environnementaux. Certains de ces modèles sont probablement utiles pour la classification et la prévision des transferts de PPP dans l'atmosphère, avec cependant, des domaines de validité variables selon les échelles de temps considérées et les processus pris en compte. **Il existe néanmoins aussi un très grand besoin de données expérimentales pour pouvoir en améliorer les performances.** A noter que ce sont des modèles pour lesquels les codes sources sont souvent non disponibles.

4.2.4. Les outils ACV

Les outils ACV ont la particularité d'avoir pour objectif d'intégrer l'ensemble des processus d'émissions. Ainsi le modèle PestLCI utilise un modèle de dérive sédimentaire pour approcher la dérive aérienne, un modèle de fugacité pour la volatilisation depuis le sol et des relations simples pour la volatilisation depuis la plante. **La limite de ces outils est celles des sous-modèles implémentés.**

4.2.5. Les outils utilisés dans le cadre de l'homologation

Les modèles utilisés dans le cadre de l'homologation des PPP intègrent bien l'émission vers l'atmosphère. A noter toutefois que la description des processus d'émission vers l'atmosphère est souvent frustrante dans ces modèles, excepté dans PEARL. La description de la volatilisation est plus ou moins complète, basée sur des relations empiriques évoquées plus haut (sauf PEARL qui est le modèle le plus détaillé en ce qui concerne la volatilisation). **Comme les modèles dédiés à l'étude des émissions, ces modèles pourraient être utilisés pour générer des FE via de la méta-modélisation.**

4.2.6. Les jeux de données

A l'application, alors que les jeux de données portant sur la dérive sédimentaire sont très nombreux, les données concernant la dérive aérienne sont beaucoup plus rares. Des mesures de dérive sédimentaire ont été réalisées en bordure de parcelles en grandes cultures, arboriculture, viticulture. Quelques mesures de dérive aérienne ont été réalisées au-dessus des cultures à l'aide de capteurs passifs (fils) surtout avec des traceurs.

En post application, des études régulières, mais peu nombreuses, ont été menées depuis les années 1990. Cependant, **il y a une grande variabilité de méthodes et de durées de suivi.** Une majorité de jeux de données porte sur la volatilisation depuis le sol ; les études à partir des applications sur plante concernent essentiellement le blé, la laitue, le chou-rave, le haricot vert, la luzerne, le pêcher, la betterave, le ray-grass, la pomme de terre, l'orge ou encore le coton. Au total, ces études portent sur une soixantaine de SA différentes dont 29 sont actuellement interdites en France, majoritairement sur des herbicides, puis sur des insecticides et des fongicides. Une large gamme de P_v a été explorée d'environ 10^{-9} Pa à 10 Pa, avec cependant un plus grand nombre d'études pour des composés avec des P_v de l'ordre de 10^{-6} à 10^{-1} Pa. **La variabilité des conditions expérimentales ainsi que des méthodologies employées rend difficile l'utilisation de ces jeux de données pour établir des FE, mais ils sont néanmoins très utiles pour les valider.**

4.3. Capacité de ces outils à reproduire les pratiques (y compris dans les DOM) et leviers d'action

Selon la prise en compte ou non des différentes pratiques dans le développement de l'outil, celui-ci sera plus ou moins adapté à la description des pratiques d'intérêt. Ainsi par exemple, l'incorporation des PPP dans le sol peut être prise en compte dans les FE de l'EPA, dans quelques relations empiriques ou dans la plupart des modèles. L'effet du non travail du sol, générant la présence de

résidus de cultures sur le sol, sur la volatilisation ne peut être reproduit que dans des modèles développés pour décrire spécifiquement la volatilisation.

Tous les outils identifiés dans ce travail prennent en compte au moins une propriété physico-chimique des PPP, ils peuvent donc différencier, avec plus ou moins de fiabilité, le comportement des divers composés. A noter toutefois que les évaluations des émissions sont entachées d'incertitude en lien avec l'incertitude des grandeurs considérées d'une part, et avec l'incertitude sur l'effet de la formulation d'autre part.

Tous les outils ici identifiés sont peu développés quant à la description du couvert végétal. Les FE ou les relations empiriques ne pourront pas différencier les cultures. Quelques modèles le peuvent *via* la hauteur du couvert et l'indice foliaire, ce qui va modifier notamment l'interception de la pulvérisation et la distribution sol/plante du PPP. Les changements de pratiques impliquant une modification importante de l'architecture du couvert, tels que les associations de cultures ou l'agroforesterie, ne sont pour l'instant pas considérés dans ces outils.

En termes de leviers d'action pendant l'application, comme la modélisation actuelle est plutôt établie à partir de classifications, on peut tester le changement de classes. Si à l'avenir des modèles mécanistes sont développés, il sera possible de quantifier les phénomènes de manière continue et de confronter les résultats avec la pratique. En post-application, les effets de la dose d'application, de l'incorporation des produits dans le sol, de la substitution de SA ou l'effet des conditions micrométéorologiques locales (comprenant l'heure d'application) peuvent être explorées grâce aux modèles dédiés à l'étude de la volatilisation. Une étape préalable d'évaluation sur une large gamme de conditions serait toutefois à recommander.

Que cela soit pour les pertes à l'application ou en post-application, la gestion de l'espace en proximité de parcelle traitée *via* la mise en place de zones non traitées, de différentes natures (zone enherbée, haie, ...) et la disposition du parcellaire permettent de limiter l'exposition d'écosystèmes non cibles aux PPP. Ainsi, la mise à disposition de modèles couplant émissions et dispersion aérienne / dépôt à une échelle plus large que la parcelle (échelle du paysage est nécessaire afin d'évaluer l'efficacité des mesures de gestion des émissions des PPP).

La capacité de ces outils à pouvoir décrire le comportement des PPP dans les DOM fait l'objet d'un rapport spécifique (Basset-Mens, 2016). En bref, peu d'éléments sont connus quant au comportement des PPP en contexte tropical vis-à-vis de l'atmosphère. Une différence de comportement entre ces conditions et les conditions continentales (Europe, Amérique du nord) pour lesquelles la plupart des études ont été menées est attendue en lien avec les différences d'utilisation (techniques d'application, PPP), de cultures et de conditions pédoclimatiques. Il serait intéressant d'approfondir ce point pour quantifier ces différences et préconiser la nature des études complémentaires à mener. Selon que ces différences sont majeures ou non, l'utilisation des outils présentés dans cette étude sera plus ou moins facile et requerra plus ou moins d'adaptation.

4.4. Priorités de travail identifiées

Afin d'améliorer les références d'émissions et leur utilisation dans les outils d'évaluation environnementale intégrant les émissions vers l'air, quelques priorités peuvent être mises en avant.

Une des premières priorités identifiées consiste à préciser et standardiser la métrologie des émissions, *via* notamment la définition de cahiers de charges pour la conception d'expérimentations les plus complètes possibles, l'acquisition des paramètres nécessaires à la prise en compte des facteurs déterminants et la mise en œuvre des modèles.

Il faudrait **aussi capitaliser les jeux de données cohérents** (anciens et nouveaux), **en lien avec l'amélioration et l'évaluation des modèles.**

Il faudrait **s'attacher à mieux quantifier et modéliser la dérive aérienne** (en plus de la dérive sédimentaire) ainsi que la mesure des phénomènes rapides (ex : volatilisation à l'application) et l'évaporation des gouttelettes.

Au vu des coûts expérimentaux et de la diversité des situations, le **lien avec les modèles apparaît essentiel pour la production de références d'émissions prenant en compte la diversité des situations pédoclimatiques et des systèmes de cultures en France**. Les modèles mécanistes existants doivent être améliorés et évalués, leur domaine de description doit être étendu à d'autres conditions pédoclimatiques (y compris les DOM), à de nouvelles cultures et à des pratiques innovantes (ex : mulch, agroforesterie, associations de cultures). **Les modèles mécanistes pourraient être utilisés pour fournir des facteurs d'émission ou des relations simples, via notamment une démarche de méta-modélisation.**

Il est aussi nécessaire de mieux renseigner la fiabilité des données sur les propriétés physico-chimiques des SA, entrées communes à tous les modèles d'estimation des émissions. Il s'agit aussi de considérer le comportement de ces SA dans le contexte de leur application au sein d'un produit formulé commercial et d'intégrer l'ensemble de la formulation (co-formulants et adjuvants) à la compréhension des processus d'émission. Ce volet est un point crucial pour améliorer la qualité de la prédiction des émissions.

Il est aussi nécessaire **de rapprocher les travaux menés sur les émissions à l'application (principalement en cultures pérennes) et en post-application (principalement en grandes cultures) pour avoir une évaluation plus complète des processus d'émission et des leviers d'actions**, notamment *via* le couplage des modèles aux échelles de la parcelle et de la petite région, ce qui nécessitera l'intégration des effets de voisinage entre parcelle et l'aménagement du paysage, considérant l'effet des zones tampon dans l'atténuation des FE (haies, bandes enherbées, ...).

Enfin, **les pratiques phytopharmaceutiques doivent être renseignées et spatialisées avec les paramètres environnementaux ayant une influence sur les émissions vers l'air aux échelles nationales et régionales**. Il pourrait s'agir notamment d'analyser les besoins d'actualiser les informations recueillies lors des enquêtes « pratiques phytosanitaires » ou dans le cadre du réseau des fermes Dephy.

Sigles et acronymes

Organismes ou instances cités

AASQA	Association agréée de surveillance de la qualité de l'air
ADEME	Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (www.ademe.fr/)
ANSES	Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (remplaçant l'AFSSA et l'AFSSET)(www.anses.fr/)
ARVALIS	Institut du végétal (www.arvalisinstitutduvegetal.fr/)
BNV-d	Banque nationale des ventes par les distributeurs agréés
CIRAD	Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement (www.cirad.fr/)
CITEPA	Centre interprofessionnel technique d'études de la pollution atmosphérique (www.citepa.org/)
CTIFL	Centre technique interprofessionnel des fruits et légumes (www.ctifl.fr/)
DGAL	Direction générale de l'alimentation
DGPAAT	Direction générale des politiques agricole, agroalimentaire et des territoires
EEA	European Environment Agency (www.eea.europa.eu/fr)
EMEP	European Monitoring and Evaluation Programme of long range transmission of air pollution
EPA	U.S. Environmental Protection Agency
IFV	Institut français de la vigne et du vin (www.vignevin.com)
INERIS	Institut national de l'environnement industriel et des risques (www.ineris.fr)
INRA	Institut national de la recherche agronomique (www.inra.fr/)
MAAF	Ministère de l'agriculture, de l'agroalimentaire et de la forêt (www.agriculture.gouv.fr/)
MEDDE	Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie (www.developpement-durable.gouv.fr/), renommé en février 2006 MEEM
MEEM	Ministère de l'environnement, de l'énergie et de la mer (www.developpement-durable.gouv.fr/)
ORP	Observatoire des résidus de pesticides (http://www.observatoire-pesticides.gouv.fr/), dont la coordination scientifique et technique est assurée par l'ANSES
UIPP	Union des Industries de la protection des plantes (www.uipp.org)

Modèles

AgDRIFT	Modèle pour estimer la dérive de pulvérisation (Bird <i>et al.</i> , 1997)
BAM	Behavior Assessment Model (Jury <i>et al.</i> , 1983a)
IDEFICS	IMAG program for Drift Evaluation from field sprayers by computer simulation, (Holterman <i>et al.</i> , 1997)
PEARL	Pesticide Emission Assessment at Regional and Local scales (Leistra <i>et al.</i> , 2001)
PEM	Pesticide Emission Model (Scholtz <i>et al.</i> , 2002a et 2002b)
PestLCI	Modèle pour estimer les émissions de produits PPP au champ dans les ACV
PRZM-2	Version 2 du Pesticide Root Zone Model (Carsel, 1984)
SURFATM-Pesticides	Modèle de volatilisation depuis une surface foliaire de SA contenues dans des PPP appliqués au champ (grandes cultures) Lichiheb <i>et al.</i> (2015 , 2016)
Volt'Air-Pesticides	Modèle de volatilisation de SA contenues dans les PPP appliqués au champ (grandes cultures) Bedos <i>et al.</i> (2009), Garcia <i>et al.</i> (2014)
Volt'Air-Veg	Couplage en cours du modèle Volt'Air-Pesticides avec le modèle SURFATM-Pesticides

References

Agreste : <http://agreste.agriculture.gouv.fr/>

Aubertot, J. N., J. M. Barbier, A. Carpentier, J. J. Gril, L. Guichard, P. Lucas, S. Savary, I. Savini, et M. Voltz. 2005. « Pesticides, agriculture et environnement. Réduire l'utilisation des pesticides et limiter leurs impacts environnementaux. » Expertise scientifique collective, synthèse du rapport. INRA et Cemagref (France), 64p.

Audsley, E., S. Alber, R. Clift, S. Cowell, P. Crettaz, G. Gaillard, J. Hausheer, et al. 2003. « Harmonisation of Environmental Life Cycle Assessment for Agriculture. » Final Report Concerted Action. Silsoe, United Kingdom: European Commission DG VI Agriculture.

Basset-Mens C. 2016. Emissions au champ de pesticides vers l'air en conditions tropicales : état de l'art et perspectives de recherche Rapport Ademe, 37p.

Bedos, C., P. Cellier, R. Calvet, E. Barriuso, et B. Gabrielle. 2002. « Mass transfer of pesticides into the atmosphere by volatilization from soils and plants: Overview ». *Agronomie* 22 (1): 21-33.

Bedos, C., M. F. Rousseau-Djabri, B. Gabrielle, D. Flura, B. Durand, E. Barriuso, et P. Cellier. 2006. « Measurement of trifluralin volatilization in the field: Relation to soil residue and effect of soil incorporation ». *Environmental Pollution* 144 (3): 958-966. doi:10.1016/j.envpol.2006.01.043.

Bedos, C., S. Genermont, E. le Cadre, L. Garcia, E. Barriuso, et P. Cellier. 2009. « Modelling pesticide volatilization after soil application using the mechanistic model Volt'Air ». *Atmospheric Environment* 43 (22-23): 3630-3639. doi:10.1016/j.atmosenv.2009.03.024.

Bedos, C., et B. Loubet. 2010. « Projet PHAR Pesticides: hiérarchisation pour les Agro-Ressources INERIS/Région Picardie ». Rapport final. Thiverval-Grignon: INRA, Unité Environnement et Grandes Cultures, 30p.

Berg, F. van den, R. Kubiak, W. G. Benjey, M. S. Majewski, S. R. Yates, G. L. Reeves, J. H. Smelt, et A. M. A. van der Linden. 1999. « Emission of pesticides into the air ». Édité par H. F. G. van Dijk, W. a. J. van Pul, et P. de Voogt. *Water, Air, and Soil Pollution* 115 (1-4): 195-218. doi:10.1023/A:1005234329622.

Berg, F. van den, A. Wolters, N. Jarvis, M. Klein, J. J. T. I. Boesten, M. Leistra, V. Linnemann, J. H. Smelt, et H. Vereecken. 2003. Improvement of concepts for pesticide volatilisation from bare soil in PEARL, PELMO, and MACRO models. Édité par A. A. M. Del Re, E. Capri, L. Padovani, et M. Trevisan. Pavia, Italy: La Goliardica Pavese s.r.l., 973-983.

Birkved, M., et M. Z. Hauschild. 2006. « PestLCI—A model for estimating field emissions of pesticides in agricultural LCA ». *Ecological Modelling* 198 (3-4): 433-451. doi:10.1016/j.ecolmodel.2006.05.035.

Bird, L., S. G. Perry, S. L. Ray, M. E. Teske, et P. N. Scherer. 1997. « An evaluation of AgDrift 1.0 model for use in aerial applications. » National Exposure Research Laboratory, US EPA, Athens, GA, USA,

Bozon, N., et B. Mohammadi. 2009. GIS-based atmospheric dispersion modelling. *Applied Geomatics*, 1(3), 59-74.

Brun, J.-M. 2007. « Modélisation à complexité réduite de la dérive. » Thèse de doctorat, Université Montpellier II, 192p.

Carsel, R. F., C. N. Smith, L. A. Mulkey, J. D. Dean, et P. Jowise. 1984. « Users manual for the pesticide root zone model: PRZM ». USEPA/ERL Report EPA-600-3-84-109. Washington D.C.

Chahine, A. 2011. « Modélisation de la dispersion aérienne de pesticides des échelles locales aux échelles régionales, influence des aménagements et quantification des niveaux d'exposition ». Thèse de doctorat, Montpellier ; École Doctorale, France: Sciences des Procédés – Sciences des Aliments, 167p..

Chahine, A., S. Dupont, C. Sinfort, et Y. Brunet. 2014. Wind-flow dynamics over a vineyard. *Boundary Layer Meteorology*., pp 557–577. Cours des Comptes (2015) Les politiques publiques de lutte contre la pollution de l'air. Rapport Cours des Comptes, 123p.

Davie-Martin, C. L., K. J. Hageman, et Yu-Ping Chin. 2013. « An improved screening tool for predicting volatilization of pesticides applied to soils ». *Environmental Science & Technology* 47 (2): 868-876. doi:10.1021/es3020277.

EEA. 1999. « EMEP/CORINAIR Atmospheric emission inventory guidebook - Second Edition 1999 ». Publication. European Environment Agency (EEA). <http://www.eea.europa.eu/publications/EMEPCORINAIR>.

EEA 2013. « EMEP/EEA Air pollutant emission inventory guidebook 2013. Technical Guidance to Prepare National Emission Inventories ». EEA Technical report No 12/2013. <http://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2013>.

EPA. 1994. « Emission factor documentation for AP-42, section 9.2.2, Pesticide Application. » Final report, 75p.

EPA. 1995. « Compilation of air pollutant emission factors - volume 1: stationary point and area sources ». AP-42 5th edition, 22p

EPA. 2001. « Chapter 9: Pesticides - Agricultural and nonagricultural ». In Emission Inventory Improvement Program, Technical Report Series Volume 3 Area Sources. <http://www.epa.gov/ttnchie1/eiip/techreport/volume03/>, 73p.

Fantke et al.. 2011

FOCUS. 2008. « Pesticides in air: considerations for exposure assessment. » Report of the FOCUS Working Group on Pesticides in Air EC Document Reference SANCO/10553/2006 Rev 2 June 2008, 327p.

- Garcia, L., C. Bedos, S. Genermont, P. Benoit, E. Barriuso, et P. Cellier. 2014. « Modeling pesticide volatilization: Testing the additional effect of gaseous adsorption on soil solid surfaces ». *Environmental Science & Technology* 48 (9): 4991-4998. doi:10.1021/es5000879.
- Gil, Y., et C. Sinfort. 2005. « Emission of pesticides to the air during sprayer application: A bibliographic review. » *Atmospheric Environment* 39 (28): 5183-5193. doi:10.1016/j.atmosenv.2005.05.019.
- Gil, Y., C. Sinfort, Y. Brunet, V. Polveche, et B. Bonicelli. 2007. « Atmospheric loss of pesticides above an artificial vineyard during air-assisted spraying ». *Atmospheric Environment* 41 (14): 2945-2957. doi:10.1016/j.atmosenv.2006.12.019.
- Gish, T. J., A. Sadeghi, et B. J. Wienhold. 1995. « Volatilization of alachlor and atrazine as influenced by surface litter ». *Chemosphere* 31 (4): 2971-2982. doi:10.1016/0045-6535(95)00157-4.
- Gouzy, A., et R. Farret. 2005. « Détermination des pesticides à surveiller dans le compartiment aérien: approche par hiérarchisation. » Synthèse du comité de pilotage No. N°INERIS-DRC-MECO-CGR-143/2005-AGo. INERIS, 141p.
- Goss, K.-U., et R. P. Schwarzenbach. 1999. « Empirical prediction of heats of vaporization and heats of adsorption of organic compounds ». *Environmental Science & Technology* 33 (19): 3390-3393. doi:10.1021/es980812j.
- Guth, J. A., F. J. Reischmann, R. Allen, D. Arnold, J. Hassink, C. R. Leake, M. W. Skidmore, et G. L. Reeves. 2004. « Volatilisation of crop protection chemicals from crop and soil surfaces under controlled conditions—prediction of volatile losses from physico-chemical properties ». *Chemosphere* 57 (8): 871-887. doi:10.1016/j.chemosphere.2004.08.011.
- Holterman, H. J., J. C. van de Zande, H. A. J. Porskamp, et J. F. M. Huijsmans. 1997. « Modelling spray drift from boom sprayers ». *Computers and Electronics in Agriculture* 19 (1): 1-22. doi:10.1016/S0168-1699(97)00018-5.
- Houbraken, M.; van den Berg, F.; Butler Ellis, C. M.; Dekeyser, D.; Nuytens, D.; De Schamphelre, M.; Spanoghe, P. 2015. Volatilisation of pesticides under field conditions: inverse modelling and pesticide fate models. *Pest. Manag. Sci.*, 72 (7), 1309–1321.
- Jansma, J. W.; Linders, J. B. H. J. *Volatilization of Pesticides from Soil and Plants after Spraying*; n 679102030; National Institute of Public Health and Environmental protection Bilthoven, 1995; p 48p.
- Jury, W. A.; Spencer, W. F.; Farmer, W. J. Behavior Assessment Model for Trace Organics in Soil: I. Model Description. *Journal of Environmental Quality*. 1983, pp 558–564.
- Larsbo M, Jarvis NJ. 2003. MACRO 5.0. A model of water flow and solute transport in macroporous soil. Technical description. Rep EmergoUppsala, Sweden: Swedish University of Agricultural Sciences, 49 pp.
- Leistra, M., A. M. A. van der Linden, J. J. T. I. Boesten, A. Tiktak, et F. van den Berg. 2001. « PEARL model for pesticide behaviour and emissions in soil-plant systems: description of the processes in FOCUS PEARL v 1.1.1 ». Wageningen: Alterra. <http://edepot.wur.nl/26563>, 115p.
- Leistra, M. 2011. « Methods for estimating the vapour pressure of organic chemicals: Application to five pesticides. » Alterra-rapport - Wageningen University and Research Centre 2215, 60p.
- L'Hermite, N., et A. Gouzy. 2009. A. Identification and classification of preoccupying pesticides for health and the environment: Sph'Air, a decision support system for air monitoring; N° DRC-09-80278-00977A; INERIS, 280p.
- Lichiheb, N., C. Bedos, E. Personne, P. Benoit, V. Bergheaud, O. Fanucci, J. Bouhlef, et E. Barriuso. 2015. « Measuring leaf penetration and volatilization of chlorothalonil and epoxiconazole applied on wheat leaves in a laboratory-scale experiment ». *Journal of Environment Quality* 44 (6): 1782-1790. doi:10.2134/jeq2015.03.0165.
- Lichiheb, N., E. Personne, C. Bedos, F. van den Berg, et E. Barriuso. 2016. Implementation of the effects of physicochemical properties on the foliar penetration of pesticides and its potential for estimating pesticide volatilization from plants. *Science of the Total Environment*. 550, 1022-1031.
- Mackay, D., et S. Paterson. 1981. « Calculating fugacity. » *Environmental Science & Technology* 15 (9): 1006-1014. doi:10.1021/es00091a001.
- Mensink, B.J.W.G., et J. B. H. J. Linders. 1998. « Airborne pesticide concentrations near greenhouses ». Report 679102040. Bilthoven: National Institute for Public Health and the Environment (RIVM), 63p.
- Nemecek, T., et T. Kägi. 2007. « Life cycle inventories of agricultural production systems. » Ecoinvent report No. 15. Zürich, Dübendorf: Agroscope Reckenholz-Taenikon Research Station ART, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, 360p. https://db.ecoinvent.org/reports/15_Agriculture.pdf.
- Personne, E., B. Loubet, B. Herrmann, M. Mattsson, J. K. Schjoerring, E. Nemitz, M. A. Sutton, et P. Cellier. 2009. « SURFATM-NH3: a model combining the surface energy balance and bi-directional exchanges of ammonia applied at the field scale ». *Biogeosciences* 6 (8): 1371-1388. doi:10.5194/bg-6-1371-2009.
- Potier, D. 2015. « Pesticides et agro-écologie. Les champs du possible ». Rapport d'évaluation et de révision du plan Ecophyto, 251p. <http://agriculture.gouv.fr/ministere/pesticides-et-agro-ecologie-les-champs-du-possible>.
- Prueger, J. H., J. L. Hatfield, et T. J. Sauer. 1999. « Field-scale metolachlor volatilization flux estimates from broadcast and banded application methods in central Iowa. » *Journal of Environmental Quality* 28 (1): 75-81.
- Raupach, M. R., P.R. Briggs, N. Ahmad, et V.E. Edge. 2001. Endosulfan transport II: Modelling airborne dispersal and deposition by spray and vapour. *Journal of Environmental Quality* 30 (3), 729–740.
- Robert, C., C. Fournier, C. Bedos, D. Gouache, et B. Perriot. 2015. « L'architecture des couverts végétaux: un levier pour réduire l'utilisation des fongicides ? (ECHAP). » Rapport final, programme Pesticides (APR 2009), 68p.

- Sanchez-Bayo, F., Hyne, R.V., 2011. Comparison of Environmental Risks of Pesticides Between Tropical and Nontropical Regions. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 7(4): 577-586.
- Scholtz, M. T., E. Voldner, A. C. McMillan, et B. J. van Heyst. 2002. « A pesticide emission model (PEM) Part I: Model development. » *Atmospheric Environment* 36 (32): 5005-5013. doi:10.1016/S1352-2310(02)00570-8.
- Seiber, J. N.; Woodrow, J. E. 1983. Methods for studying pesticide atmospheric dispersal and fate at treated areas. In *Residue Reviews: Residues of Pesticides and Other Contaminants in the Total Environment*; Gunther, F. A., Gunther, J. D., Eds.; Springer New York: New York, NY pp 217–229. http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4612-5462-1_16.
- Smidt, R. A., A. A. M. F. R. Smit, F. van den Berg, J. Denneboom, J. C. van de Zande, H. J. Holterman, et J. F. M. Huijsmans. 2000. « Beschrijving van de emissie van bestrijdingsmiddelen naar de lucht bij bespuiting van bodem of gewas in ISBEST 3.0. » Rapport 207. Wageningen, The Netherlands: Alterra, 64p.
- Smit, A. A. M. F. R., F. van den Berg, et M. Leistra. 1997. « Estimation method for the volatilization of pesticides from fallow soil ». Environmental Planning Bureau Series 2. Wageningen: DLO Winand Staring Centre, 94p.
- Smit, A. A. M. F. R., M. Leistra, et F. van den Berg. 1998. « Estimation method for the volatilization of pesticides from plants ». 1387-4292. Environmental Planning Bureau Series 4. Wageningen: DLO Winand Staring Centre, 101p.
- Tinsley, I. J. 1979. « Chapter 4: Evaporation ». In *Chemical Concepts in Pollutant Behavior*. New York: Wiley.
- Turner, B. C., D. E. Glotfelty, A. W. Taylor, et D. R. Watson. 1978. « Volatilization of Microencapsulated and Conventionally Applied Chlorpropham in the Field¹ ». *Agronomy Journal* 70 (6): 933. doi:10.2134/agronj1978.00021962007000060010x.
- Werf, H. M. G. van der, et C. Zimmer. 1998. « Un indicateur d'impact environnemental de pesticides basé sur un système expert à logique floue ». *Courrier de l'environnement de l'INRA*, n° 34 (juillet): 47-66.
- Wesenbeeck, I. van, J. Driver, et J. Ross. 2008. « Relationship between the evaporation rate and vapor pressure of moderately and highly volatile chemicals ». *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology* 80 (4): 315-318. doi:10.1007/s00128-008-9380-2.
- Whang, J. M., C. J. Schomburg, D. E. Glotfelty, et A. W. Taylor. 1993. « Volatilization of fonofos, chlorpyrifos, and atrazine from conventional and no-till surface soils in the field ». *Journal of Environmental Quality* 22 (1): 173-180.
- White, A. W.; Harper, L. A.; Leonard, R. A.; Turnbull, J. W. Trifluralin volatilization losses from a soybean field. *Journal of Environmental Quality* 1977, 6 (1), 105–110. doi:10.2134/jeq1977.00472425000600010023x.
- Woodrow, J. E., J. N. Seiber, et L. W. Baker. 1997. « Correlation techniques for estimating pesticide volatilization flux and downwind concentrations. » *Environmental Science & Technology* 31 (2): 523-529. doi:10.1021/es960357w.

ANNEXE 1 : Liste des experts consultés

Tableau 9 : Liste des experts rencontrés.

Organisme	Nom
ANSES	Arnaud BOIVIN (Evaluation des risques)
INRA EcoSys	Benoît GABRIELLE (ACV)
IRSTEA	Ariane VALLET (dérive)
	Ralph ROSENBAUM (ACV)
	Jean-Paul DOUZAIS (échanges sur projet Optiban)
SupAgro	Carole SINFORT (modèles dérive) et relecture rapport
Instituts techniques :	
- ARVALIS	Benjamin PERRIOT
- CTIFL	Franziska ZAVAGLI
UIPP/Syngenta	Ronan VIGOUROUX
	Jean-Claude TOURNAYRE
	Carole OBEIDY
Alterra Wageningen UR	Erik VAN DEN BERG (relecture du rapport intermédiaire)

Tableau 10 : Liste des experts sollicités.

Organisme	Nom
University of Guelph	Bill VAN HEYST (modèle PEM et ses évolutions)
INRA	C. Bockstaller (I-Phy)
Wageningen	Henk Jan HOLTERMAN (IDEFICS)
Ghent University	Michael HOUBRAKEN (publication)
FISABIO	Clara COSCOLLA, Vicent YUSA
EMEP	David SIMPSON (FE EMEP/Corinair)
EMEP	Barbara AMON, Nick HUTCHINGS, Rainer STEINBRECHER (FE EMEP/Corinair)
EPA	Rhonda THOMPSON (FE US-EPA)
TNO	Dr. ir. Hugo DENIER VAN DER GON
RIVM/Alterra	Ton VAN DER LINDEN & Roel KRUIJNE (FE autour des serres)
DTU	Dr Teunis Dijkman (modèle PestLCI)
DTU	Dr Peter Fantke, DTU (modèle dynamiCROP)
ESA Angers	Dr Christel Renaud-Gentié (modèle PestLCI)
CIRAD	Dr Charles Mottes (modèle dynamiCROP).

ANNEXE 2 : Paramètres d'entrée pris en compte dans les différents outils identifiés

Tableau 11 : Paramètres d'entrée par outils et disponibilité de l'information.

Paramètres	FE	Eq. de corrélations empiriques	Classes	Modèles	Accessibilité de l'information (O/N) adaptée au contexte français
Propriétés physico-chimiques					
P_v	X	X - Knudsen (P) - Woodrow (S, P, E) - Dow (S, P) - Smit (P) - Smidt (P) - Wesenbeeck (P)	X - Classes de volatilité - I-Phy 2 (Woodrow)	X - PestLCI (Wesenbeeck) - Surf atm-Pesticides - Volt'Air Pesticides - fugacité	O - P_v de la SA purifiée à 20-25 °C indiquée par les sociétés phytopharmaceutiques dans le dossier d'homologation du PPP... Mais forte variabilité des valeurs selon les sources
S_w		X - Woodrow (S) - Dow (S, P)	X - I-Phy 2 (Woodrow)	X - PEM - Surf atm-Pesticides - Volt'Air Pesticides - fugacité	O – Solubilité dans l'eau à pression atmosphérique des SA purifiées à 20 °C indiquée par les sociétés phytopharmaceutiques dans le dossier d'homologation du PPP (voir base SIRIS-Pesticides 2012)
K_H		X - Smit (S) (via FP_{gaz})	X - I-Phy 1	X - BAM - PEM - Volt'Air-Pesticides	O – K_H de la SA purifiée déterminé ou calculé et indiqué par les sociétés phytopharmaceutiques dans le dossier d'homologation du PPP
K_{oc} ou K_d		X - Woodrow (S, E) - Dow (S) - Smit (S) (via FP_{gaz})	X - I-Phy 2 (Woodrow)	X - BAM - PEM - Volt'Air-Pesticides - fugacité	O – Donnée renseignée dans la base SIRIS-Pesticides 2012 (http://www.ineris.fr/siris-pesticides/bdd_siris_pesticides)
$DT50_{sol}$			X - I-Phy 1	X - PEM - Volt'Air-Pesticides - fugacité niveau II	O – Donnée renseignée dans la base SIRIS-Pesticides 2012 (http://www.ineris.fr/siris-pesticides/bdd_siris_pesticides)
Coefficient de diffusion dans l'air et dans l'eau				X - PEM - Volt'Air-Pesticides	
Variation d'enthalpie				X - Volt'Air-Pesticides	
M		X - Knudsen		X - Volt'Air-Pesticides - Surf atm-Pesticides - Fugacité niveau I	O
Conditions pédologiques					
Θ		X - Smit (S) (via		X	

		FP _{gaz})		- BAM (fixée) - PEM - Volt'Air-Pesticides	
P		X - Smit (S) (via FP _{gaz})		X - BAM (fixée) - Volt'Air-Pesticides	
f _{oc}				X - BAM (fixée) - Volt'Air-Pesticides	
DT50 _{sol}			X - I-Phy 1		O – Donnée renseignée dans la base SIRIS-Pesticides 2012 (http://www.ineris.fr/siris-pesticides/bdd_siris_pesticides)
C _o , D _g ^a , φ, D _L ^w , d				X - BAM	O - Paramètres fixés par l'utilisateur
FP _{gas} = f(θ, ρ, K _H , K _d)		X - Smit (S)			O - En principe connue
Type de sol				X - PEM - Volt'Air	
Conditions météorologiques					
T _{air}		X - Knudsen (P)		X- PEM - Volt'Air-Pesticides	
T _{sol} , vitesse du vent, humidité, précipitations, rayonnement solaire				X - PEM - Volt'Air-Pesticides	
Patm				X - PEM	
Pratiques culturales					
Dose d'application (kg/ha)		X - Woodrow (S) optionnel	X - I-Phy 2 (Woodrow)	X - Volt'Air-Pesticides	O/N selon les données d'enquête des pratiques culturales (sélection cultures enquêtées, méthode d'extrapolation statistique ne permettant pas une description exhaustive du maillage agricole et des conditions pédoclimatiques afférentes)
Date d'application				X- Volt'Air-Pesticides	
Mode d'application (en surface, incorp. dans le sol, semences traitées)	(X) _{FE EPA}		X - Outil Sph'Air - I-Phy 1	X - PEM - Volt'Air-Pesticides	A confirmer – Données disponibles auprès des chambres régionales d'agriculture
Tech. d'application (serre)	(X)				
Profondeur d'incorporation (cm)		X- Woodrow (S si incorp)	X - I-Phy 2 (Woodrow)		
Matériel utilisé (jet, buses...)			X - Outil Sph'Air		
Type de cultures			X - Outil Sph'Air		
Stade de dév. de la vég.			X - Outil Sph'Air		

L'ADEME EN BREF

L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME) participe à la mise en œuvre des politiques publiques dans les domaines de l'environnement, de l'énergie et du développement durable. Afin de leur permettre de progresser dans leur démarche environnementale, l'agence met à disposition des entreprises, des collectivités locales, des pouvoirs publics et du grand public, ses capacités d'expertise et de conseil. Elle aide en outre au financement de projets, de la recherche à la mise en œuvre et ce, dans les domaines suivants : la gestion des déchets, la préservation des sols, l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables, la qualité de l'air et la lutte contre le bruit.

L'ADEME est un établissement public sous la tutelle conjointe du ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie et du ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche.



ADEME
20, avenue du Grésillé
BP 90406 | 49004 Angers Cedex 01

www.ademe.fr